

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra aplikované mechaniky

**Návrh a pevnostní kontrola nájezdu pro  
vrtulník**

*Design and Strength Control of the Helicopter  
Approaching Ramp*

Student:

Ing. Roman POTROK

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Jaroslav ROJÍČEK, PhD.

Ostrava 2019

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Katedra aplikované mechaniky

## Zadání bakalářské práce

Student: **Ing. Roman Potrok**  
Studijní program: B2341 Strojírenství  
Studijní obor: 3901R003 Aplikovaná mechanika  
Téma: **Návrh a pevnostní kontrola nájezdu pro vrtulník**  
**Design and Strength Control of the Helicopter Approaching Ramp**  
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Rozbor řešeného problému
2. Návrh základní konstrukce(ocel)
3. Zjednodušené analytické řešení a řešení MKP
4. Optimalizace konstrukce
5. Vyhodnocení

Seznam doporučené odborné literatury:


- [1] LENERT, J.: Pružnost a pevnost I, II, Ostrava, skripta VŠB-TU Ostrava.
- [2] LENERT, J.: Úvod do metody konečných prvků. 1. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 1999. 109 s. ISBN 80-7078-686-8.
- [3] Ansys, inc. Ansys release 19.1 documentation. <https://www.ansys.com/>, 2018. SAS IP, U.S.A.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

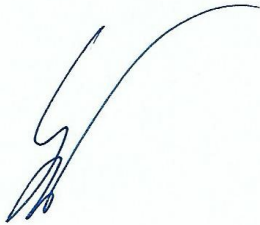
Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jaroslav Rojíček, Ph.D.**

Datum zadání: 21.12.2018

Datum odevzdání: 20.05.2019

  
Ing. Martin Fusek, Ph.D.  
vedoucí katedry



  
prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

### **Místopřísežné prohlášení studenta**

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne 19. května 2019

Handwritten signature of Petr Roman in blue ink.

.....  
Podpis studenta

Prohlašuji, že:

- jsem si vědom, že na tuto moji závěrečnou bakalářskou\*) práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užít tuto závěrečnou bakalářskou\*) práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této bakalářské\*) práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- beru na vědomí, že - podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů - že tato bakalářská práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce, a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 19. května 2019



Podpis autora práce

Jméno a příjmení autora práce:

Ing. Roman POTROK

Adresa trvalého pobytu autora práce:

U Zahradnictví 279/32

751 24, Přerov - Vinary

## **ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

POTROK, R. *Návrh a pevnostní kontrola nájezdu pro vrtulník – Bakalářská práce*. OSTRAVA: VŠB -Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra aplikované mechaniky, 2019, 67 s. Vedoucí práce: Ing. Jaroslav Rojíček, Ph.D.

Bakalářská práce se zabývá návrhem a pevnostní kontrolou nájezdové rampy pro vrtulník. V úvodní části je proveden rozbor současného stavu a jsou zde rovněž stanoveny vstupní podmínky. V následující kapitole je proveden prvotní návrh ocelových konstrukcí a to numericky metodou konečných prvků (MKP) a analyticky. Numerické řešení je provedeno v prostředí výpočetního programu ANSYS Workbench 18.2 a jsou použity nosníkové prvky. Zjednodušené analytické řešení je provedeno pouze u jednoho segmentu. V poslední kapitole je provedena optimalizace dvou segmentů a je provedena jejich pevnostní kontrola.

## **ANNOTATION OF BACHELOR THESIS**

POTROK, R. *Design and Strength Control of the Helicopter Approaching Ramp – Bachelor thesis*. OSTRAVA: VSB - Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Applied Mechanics, 2019, 67 p. Thesis head: Ing. Jaroslav Rojíček, Ph.D.

The bachelor thesis is aimed to the design and strength control of approaching ramp for helicopter. The first part is dedicated to the current state and the chapter also describes entry conditions. The following chapter consists of primary design of steel structures numerically by finite element method (FEM) and also analytically. Numerical solution is performed in the software ANSYS Workbench 18.2 and beam elements are used. A simplified analytical solution is applied only on one segment of approaching ramp. Last chapter is focused on an optimization two segments of approaching ramp and their strength control.

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval panu **Ing. Jaroslavu Rojíčkovi, Ph.D** za odborné vedení, poskytnutí cenných rad a řadu věcných připomínek v průběhu vypracovávání této bakalářské práce.

# Obsah

SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK A SYMBOLŮ .....	8
ÚVOD .....	10
1 ROZBOR ŘEŠENÉHO PROBLÉMU .....	12
1.1 Osnova řešení bakalářské práce .....	18
2 NÁJEZDOVÁ RAMPA PŘÍĐOVÉHO PODVOZKU Z OCELOVÝCH PROFILŮ .....	19
2.1 Výběr ocelových profilů .....	20
2.2 Návrh konstrukce segmentu S1 .....	21
2.2.1 Geometrický model ocelové konstrukce segmentu S1 .....	22
2.2.2 Okrajové podmínky .....	23
2.2.3 Konečno-prvkový model konstrukce segmentu S1 .....	23
2.2.4 Výsledky prvotní pevnostní kontroly návrhu konstrukce segmentu S1 .....	24
2.3 Návrh ocelové konstrukce segmentu S4 .....	26
2.3.1 Geometrický model ocelové konstrukce segmentu S4 .....	26
2.3.2 Zjednodušené analytické řešení modelu konstrukce segmentu S4 .....	28
2.3.3 Okrajové podmínky .....	36
2.3.4 Konečno-prvkový model konstrukce segmentu S4 .....	36
2.3.5 Výsledky prvotní pevnostní kontroly návrhu konstrukce segmentu S4 .....	37
3 NÁVRH MODELU POJEZDOVÉHO PLECHU K PROVEDENÍ PEVNOSTNÍ KONTROLY SEGMENTŮ NÁJEZDOVÉ RAMPY .....	40
4 PEVNOSTNÍ KONTROLA SEGMENTŮ S1 A S4 POMOCÍ SKOŘEPINOVÝCH PRVKŮ .....	44
4.1 Úprava konstrukce segmentu S1 .....	44
4.2 Úprava konstrukce segmentu S4 .....	45
4.3 Stanovení okrajových podmínek pro pevnostní kontrolu segmentů S1 a S4 .....	47
4.3.1 Okrajové podmínky konstrukce segmentu S1 .....	48
4.3.2 Okrajové podmínky konstrukce segmentu S4 .....	49
4.4 Tvorba konečno-prvkového modelu segmentů S1 a S4 .....	49
4.5 Pevnostní kontrola segmentů S1 a S4 nájezdové rampy .....	51
4.5.1 Pevnostní kontrola konstrukce segmentu S1 nájezdové rampy .....	51
4.5.2 Pevnostní kontrola konstrukce segmentu S4 nájezdové rampy .....	54
4.6 Vyhodnocení pevnostní kontroly segmentů S1 a S4 .....	58
5 ZÁVĚR .....	60
6 SEZNAM OBRÁZKŮ .....	61
7 SEZNAM TABULEK .....	63
8 LITERATURA .....	64
9 SEZNAM PŘÍLOH .....	65

## SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK A SYMBOLŮ

<u>Značení</u>	<u>Popis veličiny</u>	<u>Jednotka</u>
$\check{C}SN\ EN$	Převzatá evropská norma	[-]
$E$	modul pružnosti v tahu	[MPa]
$E_{model}$	modul pružnosti v tahu modelu pojezdového plechu	[MPa]
$F$	tíhová síla	[N]
$F_i$	osová síla v i-tém prutu	[N]
$F_{i,0}$	zatěžující síla i-tého prutu pro 0. stav	[N]
$F_{i,1}$	zatěžující síla i-tého prutu pro 1. stav	[N]
$F_{krit}$	kritická síla	[N]
$F_{LH}$	tíhová síla levého hlavního podvozku	[N]
$F_{LPK}$	zatěžující síla od levého předního kola	[N]
$F_{PPK}$	zatěžující síla od pravého předního kola	[N]
$F_{PH}$	tíhová síla pravého hlavního podvozku	[N]
$F_{PP}$	tíhová síla předového podvozku	[N]
$J$	centrální kvadratický moment setrvačnosti	[m <sup>4</sup> ]
$J_y$	kvadratický moment setrvačnosti	[m <sup>4</sup> ]
$L_i$	délka prutu	[m]
$R_e$	mez kluzu	[MPa]
$S$	plocha průřezu	[m <sup>2</sup> ]
$V_{model}$	objem modelu pojezdového plechu	[m <sup>3</sup> ]
$W_o$	průřezový modul v ohybu	[m <sup>3</sup> ]
$X_I$	zatěžující síla pro 1. stav	[-]
$a$	rozměr ocelového profilu	[mm]
$a$	materiálová konstanta Tetmajerovy aproximace	[MPa]
$b$	materiálová konstanta Tetmajerovy aproximace	[MPa]
$d$	délka pojezdového plechu	[mm]
$g$	tíhové zrychlení	[m·s <sup>-2</sup> ]
$i$	statická určitost prutové soustavy	[-]
$i_{min}$	poloměr setrvačnosti	[mm]
$k$	koeficient bezpečnosti	[-]
$l$	délka prutu (výpočet vzpěru)	[mm]
$m$	hmotnost	[kg]
$m$	počet vnějších reakcí odebraných vazbami	[-]
$m_i$	hmotnost připadající podvozek z celkové hmotnosti vrtulníku	[kg]



<b><u>Značení</u></b>	<b><u>Popis veličiny</u></b>	<b><u>Jednotka</u></b>
$n$	koeficient uložení prutu	[-]
$p$	počet prutů	[-]
$s$	počet styčníků	[-]
$\check{s}$	šířka pojezdového plechu	[mm]
$t$	tloušťka profilu	[mm]
$v$	výška pojezdového plechu	[mm]
$w_B$	deformace ve styčniku IV	[mm]
$w_{I,0}$	deformace ve styčniku IV při 0. stavu	[mm]
$w_{I,1}$	deformace ve styčniku IV při 1. stavu	[mm]
$\lambda_{sk}$	skutečná štíhlost prutu	[-]
$\lambda_{mez}$	mezní štíhlost prutu	[-]
$\rho_{model}$	hustota modelu pojezdového plechu	[kg·m-3]
$\sigma_k$	napětí na mezi kluzu	[MPa]
$\sigma_{krit}$	kritické napětí	[MPa]
$\sigma_o$	ohybové napětí	[MPa]
$\sigma_{red}$	redukované napětí	[MPa]
$\sigma_{redS1}$	maximální redukované napětí segmentu S1	[MPa]
$\sigma_{redS4}$	maximální redukované napětí segmentu S1	[MPa]

## ÚVOD

Cílem bakalářské práce je provést konstrukční návrh a následnou pevnostní analýzu nájezdu pro vrtulník Mi-171Š. Pomocí navrženého nájezdu bude možné naložení vrtulníku do strategického transportního letadla Boeing C-17 Globemaster III.

Od roku 2006 pro strategickou přepravu bojových jednotek, techniky včetně výše uvedeného typu vrtulníku, využívaly státy Severoatlantické aliance služby, a to v rámci programu SALIS, ukrajinské společnosti Avialinii Antonova a ruské společnosti Volga-Dněpr. Obě společnosti disponují transportními letadly Antonov An-124 Ruslan, do kterého je možno naložit až čtyři vrtulníky Mi-171Š. Nakládka vrtulníku Mi – 171Š do ruského transportního letadla An-124 Ruslan je zobrazena na obrázku č. 1. Vzhledem ke skutečnosti, že obě společnosti přestanou od příštího roku s NATO spolupracovat, bylo nutné pro strategickou přepravu techniky a jednotek vyhledat alternativní řešení. S rozhodnutím o využití nového typu transportního letadla pro strategickou přepravu se objevila otázka, jak naložit vrtulník. Jelikož nájezdové rampy používané do letadel ruské výroby nejsou kompatibilní se zvoleným americkým typem transportního letadla, je nutné vyrobit odpovídající nájezdový systém, umožňující bezproblémové naložení a vyložení vrtulníku.

*Obrázek č. 1: Nakládání vrtulníku MI-171Š do transportního letadla An-124 Russlan*



Zdroj: <https://www.ceskenoviny.cz/zpravy/v-namesti-je-obri-c-17-globemaster-kvuli-nakladce-vrtulniku/1633305> [8]

Celý nájezdový systém musí poskytnout plynulé a bezpečné naložení vrtulníku do transportního letadla. Vzhledem ke skutečnosti, že se jedná o nemalé finanční částky (transportní letadlo, vrtulník), které se pohybují řádově ve stovkách milionů, není zde prostor pro jakékoliv selhání nájezdového systému. Nájezdový systém pro vrtulník MI-171Š do transportního letadla C-17 plní dvě následující základní funkce. V první řadě prodlužuje nájezdovou rampu transportního letadla, čímž vytváří její odpovídající sklon pro bezproblémové naložení vrtulníku do nákladového prostoru transportního letadla a jeho opětovné vyložení. Za druhé prostřednictvím nájezdové rampy příďového podvozku zvedá přední část vrtulníku, čímž současně snižuje výšku (respektive sklon) ocasního nosníku. Vzhledem k limitující výšce nákladového prostoru by bez této nájezdové rampy došlo k nárazu ocasního nosníku do trupu letadla, a tím k jejich vzájemnému poškození. Naložení vrtulníku do transportního letadla C-17Globemaster III je uveden na obrázku č. 2.

**Bakalářská práce bude zaměřena na zhotovení konstrukčního návrhu nájezdové rampy příďového podvozku s následnou pevnostní analýzou.**

*Obrázek č. 2: Vrtulník Mi-171Š v nákladovém prostoru letadla C-17Globemaster III*



# 1 ROZBOR ŘEŠENÉHO PROBLÉMU

Cílem bakalářské práce je zhotovení konstrukčního návrhu s následnou pevnostní kontrolou nájezdové rampy příďového podvozku. Pokud by došlo k její destrukci v průběhu nakládání vrtulníku do transportního letadla, došlo by ke kontaktu vrtulníku s trupem transportního letadla, vznikly by k vysoké finanční škody, a to jednak na straně letecké techniky Armády České republiky (dále AČR), tak i na straně spojenců. V případě nehody lze předpokládat, že přepravovaný vrtulník by měl poškozen ocasní nosník, koncový nosník a hlavu vyrovnávacího rotoru. Škody na spojeneckém transportním letadle by byly závažnějšího charakteru. Poškozeny by byly přepážky trupu letadla, lanovody, potrubí, případně střední část spojení polovin křídel. Oprava tohoto typu poškození je velice komplikovaná a nákladná. Nebylo by ji možné provést na místě, ale vyžadovala by převoz poškozené letecké techniky do opravárenského zařízení. Predikce výčtu možných poškození a odstranění jejich následků je založeno na vlastní, více než 25 leté praxe, v oblasti údržby a oprav letecké techniky.

Dalším negativem je snížení operačních schopností vyčleněné jednotky AČR, nemožnost plnění stanovených úkolů v místě působení a současně dojde ke snížení, omezení přepravní kapacity spojeneckých sil. Dále je nutné si uvědomit skutečnost, že se do jednoho letadla vejde pouze jeden vrtulník, avšak v místě působení budou vždy působit dva a více vrtulníků. Pokud by všechny vrtulníky byly přepravovány současně několika transportními letadly najednou a došlo by, vlivem špatného konstrukčního či pevnostního návrhu k destrukci všech nájezdů, škody na letecké technice by se násobily. Z výše uvedených důvodů nelze návrh a následnou pevnostní analýzu podceňovat.

První zkušební souprava nájezdu vrtulníku byla vyrobena ze dřeva, podle rozměrů poskytnutých spojenci, a to pod časovým tlakem bez odpovídající pevnostního posouzení. Kompletní nájezdový systém se skládá z následujících prvků:

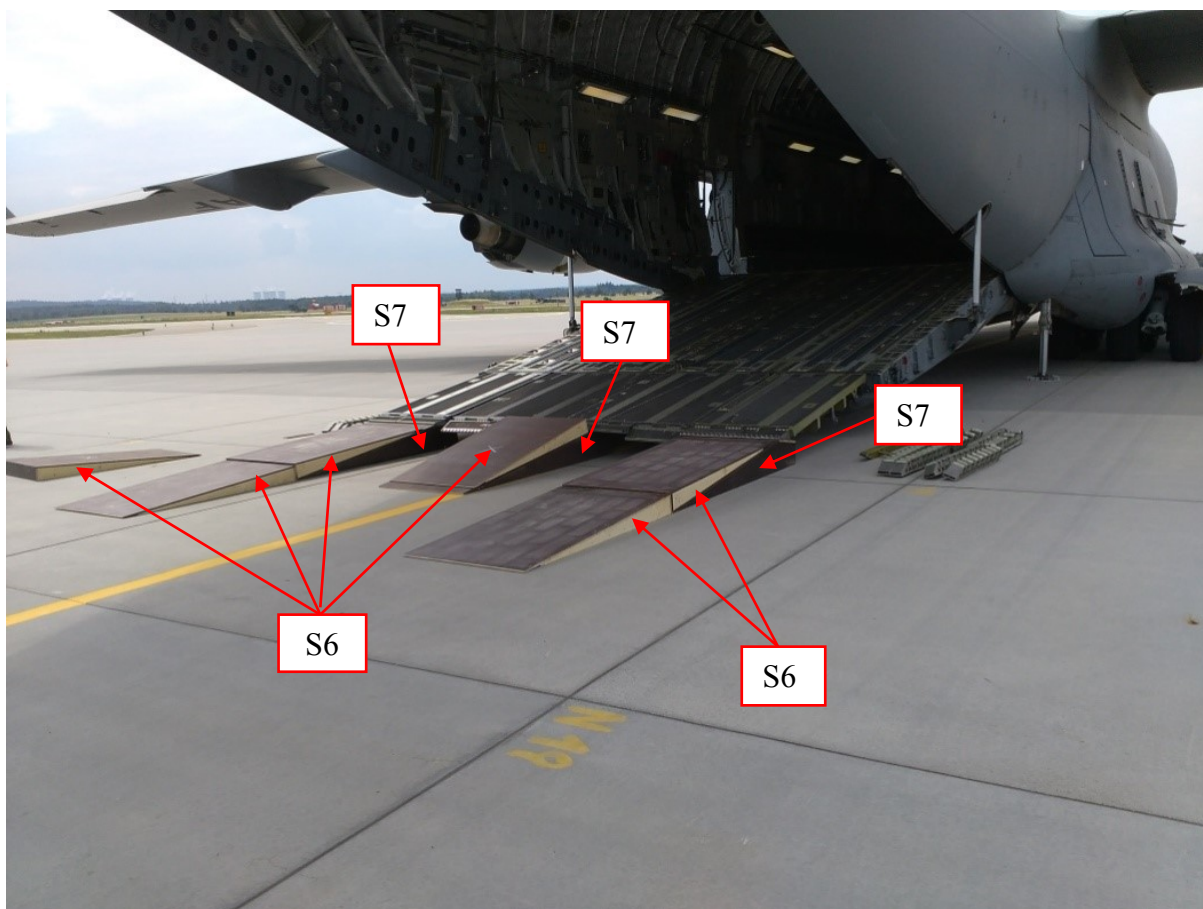
- šesti nízkých klínů,
- třech vysokých klínů,
- nájezdové rampy příďového podvozku.

Prostřednictvím výše uvedených prvků se sestaví nájezdy pro kola hlavního podvozku a také nájezdová rampa příďového podvozku vrtulníku, které prodlužují nájezdovou rampu transportního letadla a současně vytvoří její sklon pro bezpečné a pohodlné naložení vrtulníku (nájezdy jsou rovněž používány pro vyložení vrtulníku). Sestavení nájezdové rampy kol hlavního podvozku a prodloužení nákladní rampy transportního letadla pro kola příďového podvozku jsou pro lepší představivost zobrazeny na obrázku č. 3, přičemž nízké



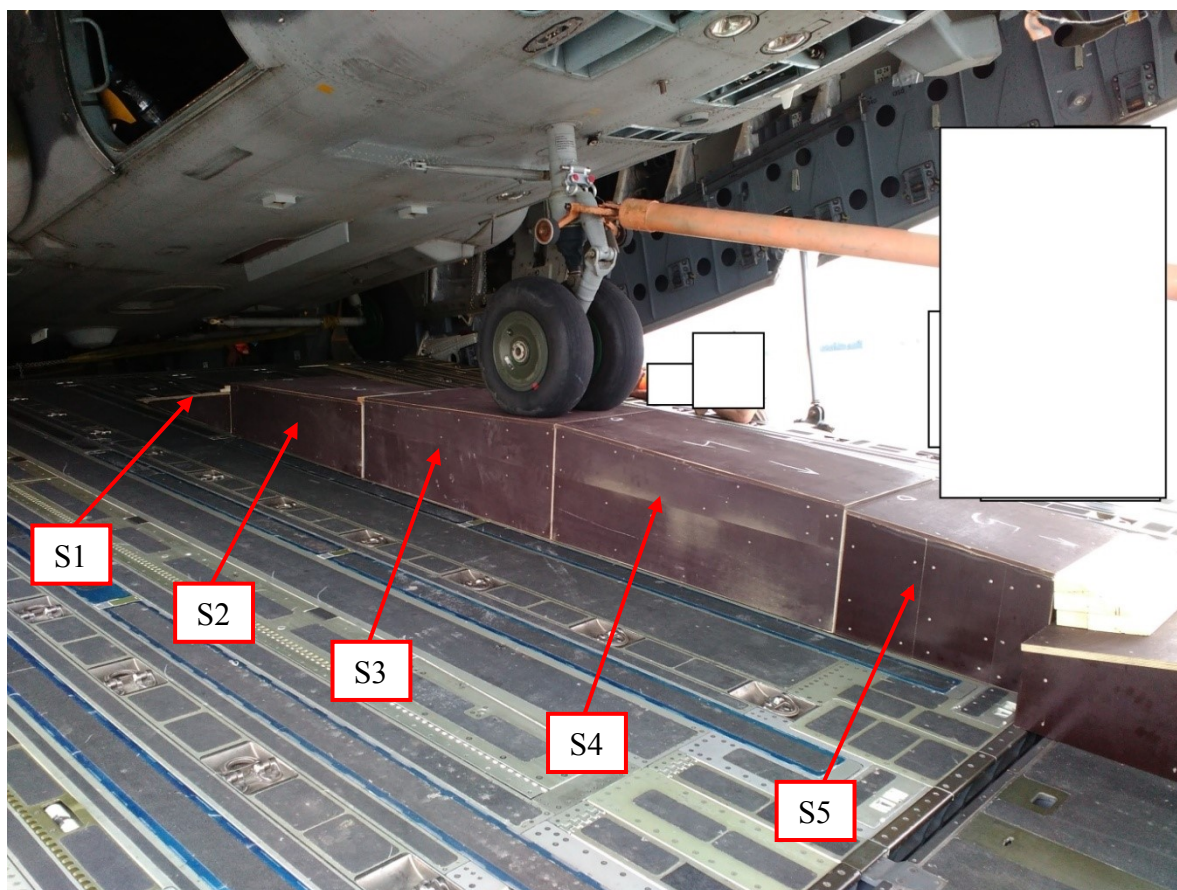
klíny jsou na níže uvedeném obrázku označeny pozicí S6 a vysoké klíny jsou na obrázku č. 3 označeny pozicí S7.

*Obrázek č. 3: Nájezdový systém vrtulníku Mi-171Š do transportního letadla C-17*



Nájezdová rampa předového podvozku (dále jen nájezdová rampa) je tvořena pěti samostatnými segmenty. Bez rozdělení nájezdové rampy na jednotlivé segmenty by nebylo možné naložit ani vyložit vrtulník. Během těchto činností je nutné, vzhledem k nízké světlé výšce mezi spodní částí trupu vrtulníku a nákladní rampou transportního letadla, postupné přidávání, případně odebírání segmentů, aby nedošlo k vzájemnému kontaktu spodní části trupu vrtulníku s nájezdovou rampou. Celkový pohled na dřevěnou nájezdovou rampu s očíslováním jednotlivých segmentů je zobrazen na obrázku č. 4, přičemž segmenty jsou číslovány S1 – S5. Uvedené značení segmentů bude používáno pro lepší orientaci v průběhu celé bakalářské práce.

Obrázek č. 4: Dřevěná nájezdová rampa předového podvozku s očíslovanými segmenty



Během zkušebního nakládání vrtulníku v květnu 2018 byly zjištěny některé nedostatky, které musí být odstraněny pro zajištění bezpečné nakládky, potažmo vykládky vrtulníku do/z letadla. Především se jedná o odstranění 80 mm skoku mezi segmenty S1 a S2. Ukázalo se, že navržený 80 mm rozdíl výšek mezi segmenty S1 a S2 nemá z praktického hlediska žádný význam. Jestliže se vrtulník pohybuje po nerovné ploše, dochází ke zhoupnutí vrtulníku a následným výkmitům ocasního a koncového nosníku, a to jak do stran, tak i směrem nahoru a dolů. Výkmity ocasního a koncového nosníku mohou mít za následek nežádoucí vzájemný kontakt vrtulníku s letadlem. K zabezpečení plynulého pohybu vrtulníku bylo nutné během praktické ukázky výše uvedenou nerovnost odstranit. Operativně se do inkriminovaného místa vkládaly kousky dřeva, aby se vytvořil plynulý přechod mezi oběma segmenty. Popisovaná situace je zobrazena na obrázku č. 5, přičemž místo vyrovnání zmiňované nerovnosti je na obrázku označeno v kroužku.



Obrázek č. 5: Nájezdová rampa předového podvozku s vyznačením 80 mm nerovností



Dále je nutné jednotlivé segmenty doplnit o vhodné kotvící prvky zamezující nežádoucímu posunutí některého ze segmentů nájezdové rampy předového podvozku. Při praktické ukázce došlo při vykládání vrtulníku z letadla k posunutí segmentů S4 a S5 a došlo k propadnutí vrtulníku o několik centimetrů dolů, čímž došlo ke zhroupení vrtulníku. Bohužel tato situace nastala v místě, kde prochází křídla letadla a následkem zhroupení vrtulníku došlo k letmému vzájemnému kontaktu vrtulníku s letadlem. Umístění kotvících prvků pro vzájemné spojení jednotlivých segmentů a ukotvení k nákladní rampě transportního letadla nebude součástí bakalářské práce.

Na základě výše popsaného rozboru skutečného stavu je nutné pro řešení zadaného úkolu stanovit podmínky řešení:

1. Aby byla zajištěna dostatečná pevnost nájezdové rampy pro bezpečné používání, je nutné stanovit odpovídající bezpečnostní koeficient. V české technické normě ČSN EN 1915-2+A, *Pozemní zařízení pro letadla Část 2: Požadavky na stabilitu a pevnost, výpočty a zkušební metody* jsou stanoveny součinitele pro napětí. Jejich hodnoty se pohybují v rozmezí 1,3 – 2,1 [7]. Pro konstrukční návrh nájezdové rampy a následnou pevnostní analýzu jsem **stanovil bezpečnostní koeficient  $k = 2,5-3$** .

2. Předpokládá se, že s jednotlivými segmenty nájezdové rampy bude manipulováno ručně, a proto dalším limitujícím faktorem návrhu je hmotnost jednoho kusu segmentu. Je požadováno, aby s jedním segmentem manipulovaly pouze dvě osoby, a proto by **maximální hmotnost jednoho segmentu neměla být, na základě legislativy platné v době zpracovávání bakalářské práce, větší než 60 kg.**

3. Poslední podmínkou je, aby nájezdová rampa mohla být vyrobena vlastními silami a prostředky letky oprav letecké techniky a to za předpokladu, že budou splněny výše uvedené vstupní podmínky. Z toho důvodu **pro návrh konstrukce nájezdové rampy byla zvolena konstrukční ocel.**

4. Podvozek vrtulníku Mi-171Š se skládá z hlavního a dvoukolového předového podvozku. Hmotnost prázdného vrtulníku je cca 8 200 kg. Pro správný návrh konstrukce je nutné znát, jak je celková hmotnost vrtulníku rozložena mezi jednotlivá kola podvozku vrtulníku. Rozložení hmotnosti a odpovídající velikosti tíhové síly na jednotlivá kola jsou uvedeny v tabulce č. 1. Velikost tíhové síly jsem vypočítal podle základního vztahu:

$$F = m_i \cdot g \quad (1.1)$$

kde  $m_i$  - hmotnost připadající podvozek z celkové hmotnosti vrtulníku

$g$  - tíhové zrychlení ( $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ )

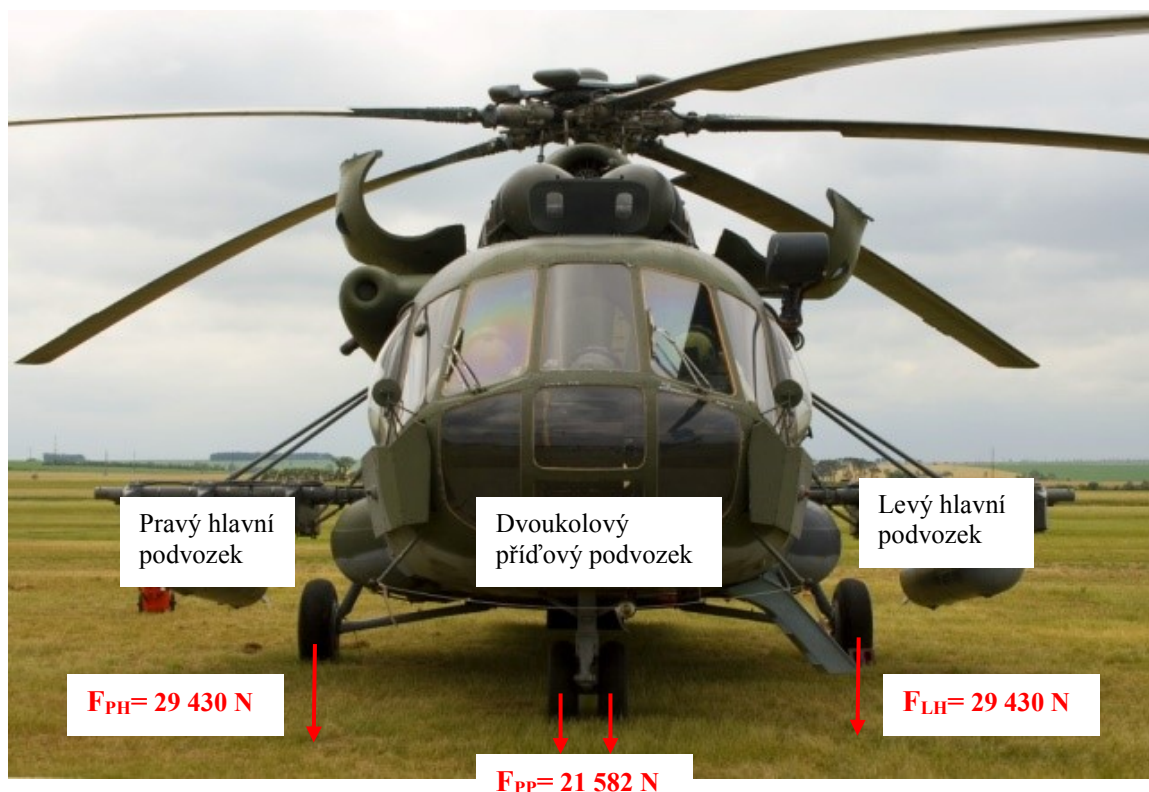
*Tabulka č. 1: Rozložení celkové váhy vrtulníku mezi jednotlivá kola podvozku*

		Hmotnost	Tíhová síla	
		[kg]	[N]	[N]
Kolo levého hlavního podvozku	F <sub>LH</sub>	3 000	29 430	30 000
Kolo pravého hlavního podvozku	F <sub>PH</sub>	3 000	29 430	30 000
Kola předového podvozku	F <sub>PP</sub>	2 200	21 582	22 000

V bakalářské práci budou používány zaokrouhlené hodnoty tíhové síly, a to na celé tisíce (údaj v posledním sloupci tabulky č. 1). Jelikož předový podvozek je dvoukolový, tíhová síla  $F_{PP} = 22\,000 \text{ N}$  je součtem sil od levého a pravého kola předového podvozku.



Obrázek č. 6: Podvozek vrtulníku Mi-171Š



Zdroj: <https://www.valka.cz/attachments/1945/photo.jpg>

5. Během tahání vrtulníku je nutné dbát zvýšené opatrnosti, aby nedošlo k jakémukoliv poškození. Rovněž z bezpečnostních důvodů je rychlost tahání vrtulníku velmi nízká. Vzhledem k této skutečnosti **se jedná o statické zatížení nájezdové rampy vrtulníkem.**

6. Pevnostní analýza navržené konstrukce nájezdové rampy bude provedena metodou konečných prvků, a to prostřednictvím programu ANSYS Workbench 18.2. Dále bude provedeno analytické řešení, ve kterém bude provedena kontrola vzpěru, statické posouzení konstrukce nájezdové rampy pouze v rovině a výpočet ohybového momentu. **Vzhledem k tomu, že plastické deformace konstrukce jsou nepřípustné, bude se jednat o lineární řešení a pevnost konstrukce bude řešena pouze do meze kluzu.**

Shrnutím výše uvedených bodů vyplývá úkol bakalářské práce, kterým je provedení návrhu ocelové konstrukce nájezdové rampy s následnou pevnostní kontrolou a její optimalizací. Snahou při návrhu konstrukce bude splnění výše stanovených podmínek.

## 1.1 Osnova řešení bakalářské práce

Na základě výše uvedeného popisu a stanovení podmínek byla sestavena osnova řešení bakalářské práce:

a) V přípravné části bakalářské práce bude sestaven hrubý model konstrukce nájezdové rampy z ocelových profilů. Výběr vhodných ocelových profilů a jejich prvotní pevnostní kontrola bude řešena analyticky. Nejdříve bude provedeno statické posouzení příhradové konstrukce, a to pouze v rovině. Po nalezení nejvíce namáhaného ocelového prutu na tlak bude provedena jeho kontrola vzpěr. Následně bude provedeno pevnostní posouzení modelu konstrukce nájezdové rampy metodou konečných prvků, a to prostřednictvím výpočetního programu ANSYS Workbench 18.2 (studijní licence). Prvotní pevnostní posouzení navržené konstrukce bude provedeno pomocí nosníkových prvků.

b) Na konstrukci pojezdové části všech segmentů nájezdové rampy bude použitý ocelový pojezdový plech s prolisy. Z důvodu zjednodušení pevnostní analýzy bude navržen model pojezdového plechu bez prolisů se shodnými vlastnostmi s plechem, který bude použit na skutečnou konstrukci, tedy jako ocelový pojezdový plech s prolisy.

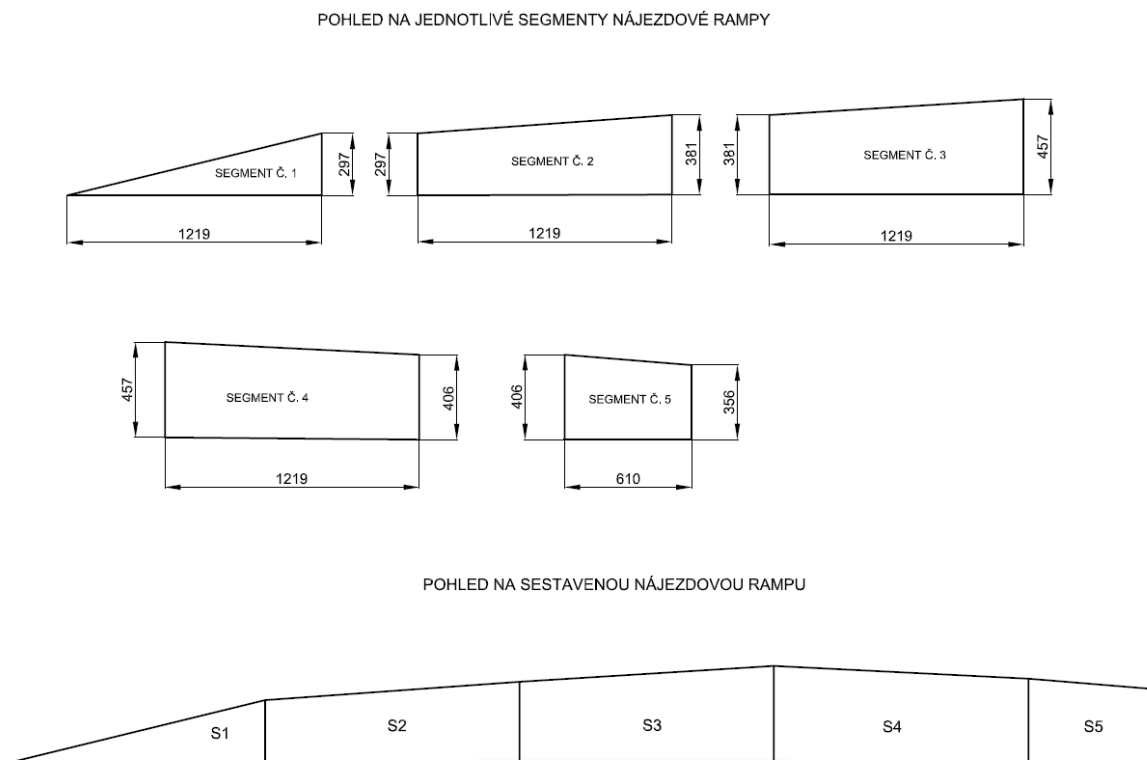
c) Posledním krokem bude vytvoření skořepinového modelu konstrukce ve shodném programu ze zvolených ocelových profilů. Jestliže konstrukce nebude splňovat podmínku bezpečnosti, bude provedena úprava konstrukce, která bude opět pevnostně zkontrolována. Dosažené výsledky budou následně vyhodnoceny.

## 2 NÁJEZDOVÁ RAMPA PŘÍĐOVÉHO PODVOZKU Z OCELOVÝCH PROFILŮ

Nedostatky zjištěné během zkušebního provozu dřevěné rampy, které byly uvedeny v předcházející kapitole, byly odstraněny změnou výšek segmentů. Sestavením nájezdové rampy v jeden kompaktní celek bude vytvořena souvislá plynulá pojezdová plocha. Rozměry jednotlivých segmentů a boční pohled na sestavený komplet nájezdové rampy je vyobrazen na obrázku č. 6. Pro doplnění je třeba uvést šířku segmentů, která je stejná pro všechny segmenty nájezdové rampy a je 610 mm. Při pohledu na obrázek zjistíme, že se v kompletu nájezdové rampy nacházejí segmenty dvou odlišných tvarů. Segmenty S2 – S4 mají shodný tvar a liší se pouze výškou. Segment S5 má, ve srovnání se zbylými čtyřmi segmenty, poloviční délku. Předmětem konstrukčního návrhu a pevnostní analýzy bude segment S1 a segment S4. Uvedené segmenty byly pro konstrukční návrh a pevnostní analýzu vybrány z následujících důvodů:

1. Segment S1 má jiný tvar, a tudíž bude mít i jinou konstrukci.
2. Segment S4 byl zvolen, protože je ze všech zbylých segmentů S2 – S5 nejvyšší a jestliže navržená konstrukce bude vyhovovat stanoveným kritériím, budou rovněž vyhovovat i zbylé segmenty.

Obrázek č. 7: Náskres nájezdové rampy po odstranění nerovností



## 2.1 Výběr ocelových profilů

Ocelové profily pro návrh modelu konstrukcí obou segmentů budou vybrány z nabídky společnosti FERRUM, s.r.o. zabývající se prodejem hutního materiálu. Jedná se o společnost s dlouhou tradicí, která působí na českém trhu již od roku 1993. V nabídce firmy je rozmanitý sortiment tyčového materiálu. Lze si vybrat buď plné tyče, anebo některý z otevřených či uzavřených ocelových profilů, a to čtvercového, obdélníkového případně kruhového průřezu. Sídlo společnosti Ferrum, s.r.o., včetně prodejního skladu se nachází v Moravských Budějovicích. Společnost má rovněž jeden ze svých prodejních skladů v Třebíči, což je velmi výhodné z hlediska dopravy, neboť letiště se nachází v Náměšti nad Oslavou. Aktuální nabídka společnosti je dostupná na webových stránkách firmy [www.ferrum-mb.cz](http://www.ferrum-mb.cz).

Profily jsou vyrobeny z konstrukční oceli S235JR se zaručenou svařitelností. V nabídce firmy jsou rovněž ocelové profily vyrobené z konstrukčních ocelí S275 a S355, které mají rovněž zaručenou svařitelnost. Finální výběr vhodné konstrukční oceli bude proveden na základě výsledků z prvotní pevnostní kontroly tak, aby byla splněna podmínka požadovaného bezpečnostního koeficientu. V níže uvedených tabulkách jsou uvedeny vybrané ocelové profily, přičemž v tabulce č. 2 jsou uvedeny varianty kombinací ocelových profilů pro návrh konstrukce segmentu S1 a v tabulce č. 3 pro návrh konstrukce segmentu S4. Jestliže je ve sloupci Podélník/Příčník uveden pouze jeden údaj, tak to znamená, že jsou horní i spodní podélníky a příčníky vyrobeny z jednoho typu profilu. Do výběru byly zahrnuty ocelové profily jak čtvercového, tak i obdélníkového průřezu.

*Tabulka č. 2: Rozměry ocelových profilů pro návrh konstrukce segmentu S1*

<b>Varianta</b>	<b>Podélník, Příčník</b> (horní/dolní) [mm]	<b>Vzpěra</b> [mm]	<b>Výztuha</b> [mm]
1.	40x30x2	30x30x2	20x20x2
	40x20x2		
2.	30x15x1,5	30x30x2	15x15x1,5
	30x15x1,5		
3.	30x30x1,5	30x30x2	15x15x1,5
	30x10x2		
4.	40x30x2	30x30x2	20x20x2
	30x15x2		

Tabulka č. 3: Rozměry ocelových profilů pro návrh konstrukce segmentu S4

<b>Varianta</b>	<b>Podélník, příčník</b> (Horní/spodní) [mm]	<b>Vzpěra</b> [mm]	<b>Výztuha</b> [mm]
1.	40x40x2	40x40x2	20x20x2
	40x20x2		
2.	30x30x2	30x30x2	20x20x2
3.	50x30x2	30x30x2	15x15x1,5
4.	40x25x2	25x25x2	20x20x1,5
5.	30x30x2	30x30x2	30x30x2
6.	40x25x2	25x25x2	20x20x2
	30x10x2		

V následujících podkapitolách budou provedeny prvotní návrhy konstrukcí segmentů S1 a S4, které budeme považovat za testovací. Cílem je vybrat odpovídající ocelové profily z tabulky č. 2 a tabulky č. 3. Prvotní konstrukční návrhy obou segmentů budou vytvořeny odhadem, a to na základě znalostí z oblasti prutových konstrukcí. Nejdříve bude v podkapitole 2.2 proveden návrh konstrukce segmentu S1, včetně výběru ocelových profilů. Následující podkapitola 2.3 bude zaměřena na konstrukční návrh segmentu S4, ve které bude provedeno zjednodušené analytické řešení. Poté bude následovat numerické řešení a výsledkem opět bude výběr vhodných ocelových profilů. Postup řešení návrhu konstrukce segmentů bude prováděn v následujících krocích:

1. Geometrický model konstrukce,
2. zjednodušené analytické řešení (pouze u segmentu S4),
3. stanovení okrajových podmínek,
4. tvorba konečno-prvkového modelu,
5. výsledky včetně výběru ocelových profilů.

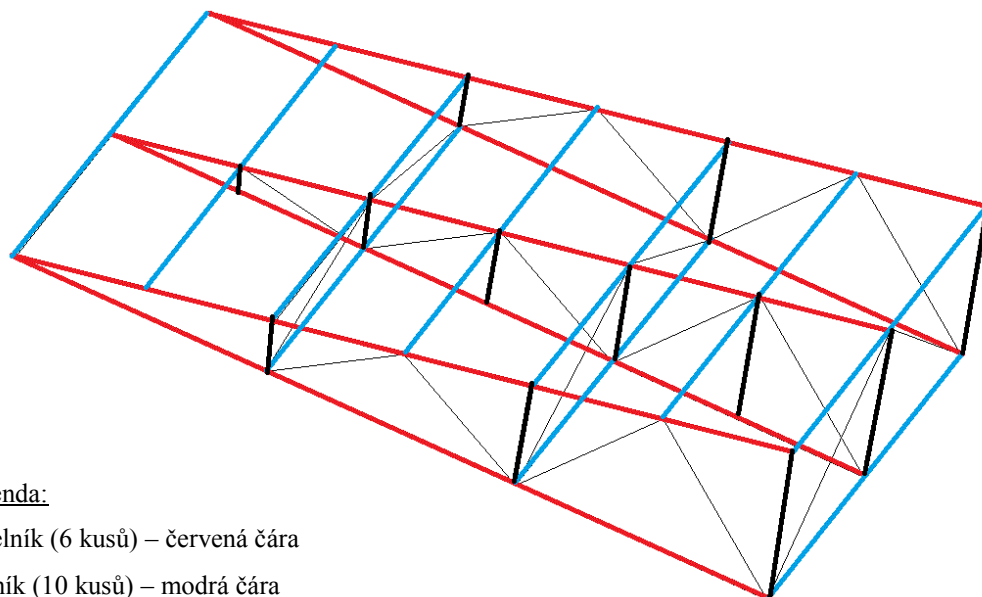
## 2.2 Návrh konstrukce segmentu S1

Prvotní návrh konstrukce segmentu S1 a jeho pevnostní posouzení bude provedeno v prostředí výpočetního programu ANSYS Workbench 18.2, a to pomocí nosíkových prvků. Cílem je zvolit vhodné ocelové profily pro jeho výrobu.

### 2.2.1 Geometrický model ocelové konstrukce segmentu S1

Konstrukce segmentu S1 je podélně symetrická a je složena z podélníků, příčníků, kolmých vzpěr a šikmých výztuh. Geometrický model ocelové konstrukce segmentu S1 je zobrazen na obrázku č. 8. Jednotlivé prvky jsou na obrázku barevně rozlišeny.

Obrázek č. 8: Geometrický model ocelové konstrukce segmentu S1



Legenda:

Podélník (6 kusů) – červená čára

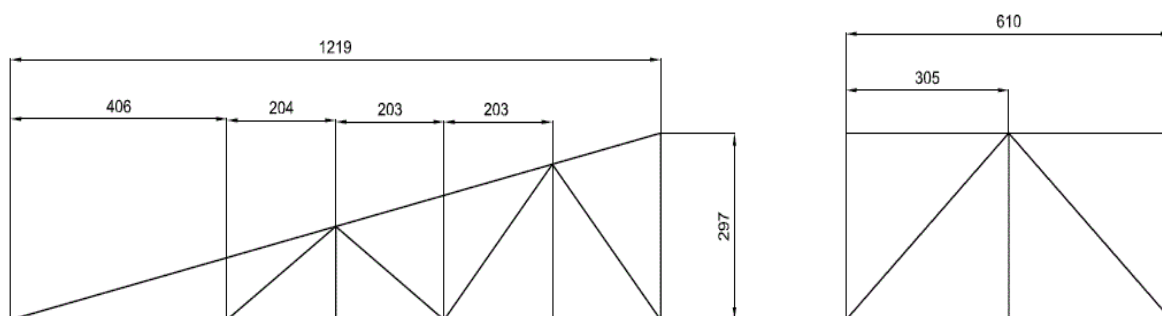
Příčník (10 kusů) – modrá čára

Vzpěra (12 kusů) – černá čára tlustá

Výztuha (23 kusů) – černá čára tenká

Z důvodu lepší představivosti jsou na následujícím obrázku č. 9 zobrazeny základní rozměry segmentu S1. Všechny uvedené rozměry jsou v milimetrech.

Obrázek č. 9: Základní rozměry segmentu S1



### 2.2.2 Okrajové podmínky

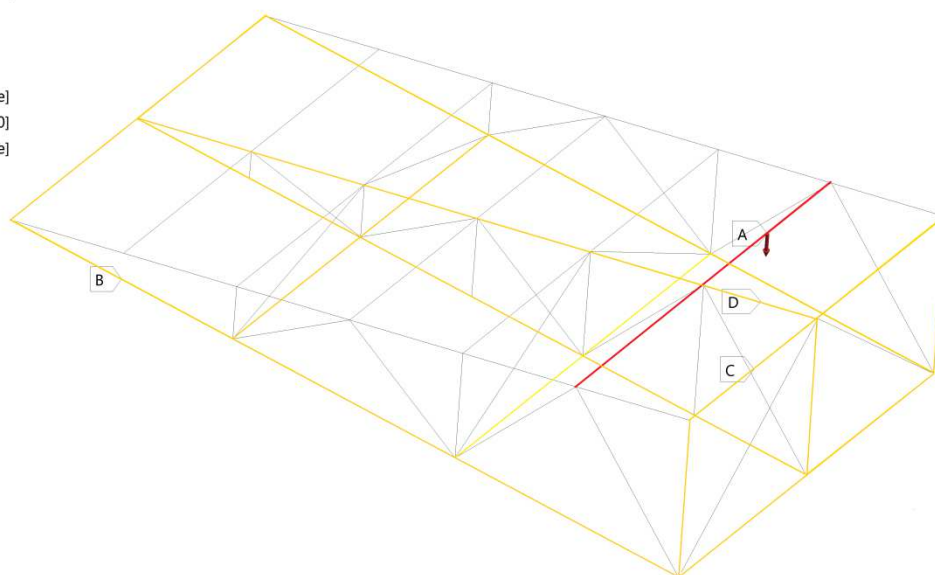
Kola příďového podvozku pokrývají většinu povrchu nájezdové rampy, a proto byla, v případě prvotní pevnostní kontroly, zatěžující síla o celkové hodnotě 22 000 N umístěná po celé délce nosníku. Jestliže se příďový podvozek nachází mezi dvěma příčnicí, zatěžující síla je poměrně rozložena mezi ně. Během provozu bude každý segment nájezdové rampy ukotven k nákladní rampě transportního letadla a jednotlivé segmenty budou vzájemně spojeny, aby bylo zabráněno jejich pohybu. K provedení pevnostní kontroly byly použity následující okrajové podmínky, které jsou zobrazeny na obrázku č. 10:

- A. Zatěžující síla  $F = 22\,000\text{ N}$  byla umístěná na horní sudý příčnic
- B. Posuvná vazba B – odebírání 1° volnosti v ose y
- C. Posuvná vazba C – odebírání 1° volnosti v ose x
- D. Posuvná vazba D – odebírání 1° volnosti v ose z

Obrázek č. 10: Okrajové podmínky segmentu S1

**A: Segment S1\_nosníkové prvky**  
Static Structural  
Time: 1, s

- A** Force: 22000 N
- B** Posuvná\_vazba\_[Free;0;Free]
- C** Posuvná\_vazba\_[Free;Free;0]
- D** Posuvná\_vazba\_[0;Free;Free]



### 2.2.3 Konečno-prvkový model konstrukce segmentu S1

Model segmentu S1 byl vytvořen pomocí nosníkových prvků ve výpočetním programu ANSYS Workbench 18.2. K provedení prvotní pevnostní kontroly testovacího návrhu konstrukce segmentu S1 byl vytvořen konečno-prvkový model, jehož parametry jsou uvedeny v tabulce č. 4.

Tabulka č. 4: Parametry konečno-prvkového modelu z nosníkových prvků segmentu S1

Typ elementu	Obdélník
Velikost elementu	4 mm
Počet elementů sítě	5 448
Počet uzlů	10 848

#### 2.2.4 Výsledky prvotní pevnostní kontroly návrhu konstrukce segmentu S1

V tabulce č. 5 jsou uvedeny výsledky prvotní pevnostní analýzy nosníkových prvků, na základě kterých budou vybrány vhodné ocelové profily pro návrh konstrukce segmentu. Hodnoty hmotnosti a maximálního ohybového momentu  $M_o$  byly získány z programu ANSYS Workbench 18.2. Zbývající hodnoty byly dopočítány. Vzhledem k rozsahu bakalářské práce nebude v bakalářské práci popsána teorie ohybu. Budou zde uvedeny pouze základní vzorce podle, kterých jsem postupoval. Teoretické základ jsem čerpal z volně dostupných zdrojů [1]. Výpočet průřezového modulu v ohybu  $W_o$  jsem vypočítal podle vztahu:

$$W_o = \frac{J_y}{e} \quad [\text{mm}^3] \quad (2.1)$$

kde:  $J_y$  – kvadratický moment setrvačnosti  $[\text{mm}^4]$   
 $e$  – vzdálenost od neutrální osy  $[\text{mm}]$

Ohybové napětí  $\sigma_o$  jsem vypočítal podle vztahu

$$\sigma_o = \frac{M_o}{W_o} \quad [\text{MPa}] \quad (2.2)$$

Výsledná bezpečnost pro ohybové napětí  $\sigma_o$  je:

$$k = \frac{R_e}{\sigma_o} \quad [-] \quad (2.3)$$

kde  $R_e$  je mez kluzu konstrukční oceli S355, která je  $R_e = 355 \text{ MPa}$ .



Tabulka č. 5: Výsledky z programu ANSYS Workbench 18.2 pro zvolené ocelové profily

Varianta	Hmotnost $m$ [kg]	Maximální ohybový moment $M_o$ [Nm]	Kvadratický moment setrvačnosti $J_y$ [mm <sup>4</sup> ]	Průřezový modul v ohybu $W_o$ [mm <sup>3</sup> ]	Ohybové napětí $\sigma_o$ [MPa]	Výsledná bezpečnost (ocel S355) $k$ [-]
1.	36,653	358,85	58912	2945,60	121,83	2,91
2.	21,017	372,73	17639	1175,91	316,97	1,12
3.	24,503	362,77	29419	1961,24	184,97	1,92
4.	32,86	366,56	58912	2945,60	124,44	2,85

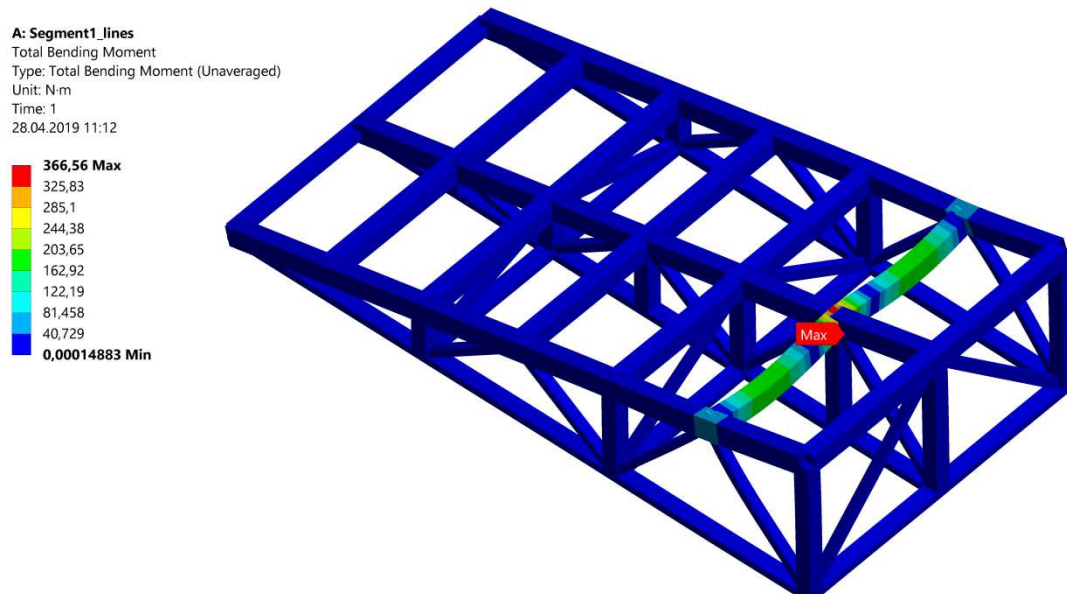
Porovnáním výsledků prvotní pevnostní kontroly se vstupními požadavky, jsem se rozhodl pro kombinaci ocelových profilů varianty č. 4 (červený řádek v tabulce č. 5). Rozměry vybraných ocelových profilů pro konstrukci segmentu S1 jsou uvedeny v tabulce č. 6. Aby byla splněna podmínka koeficientu bezpečnosti ( $k = 2,5 - 3$ ), bude na výrobu použita konstrukční ocel S355J0.

Tabulka č. 6: Rozměry ocelových profilů zvolené varianty pro konstrukci segmentu S1

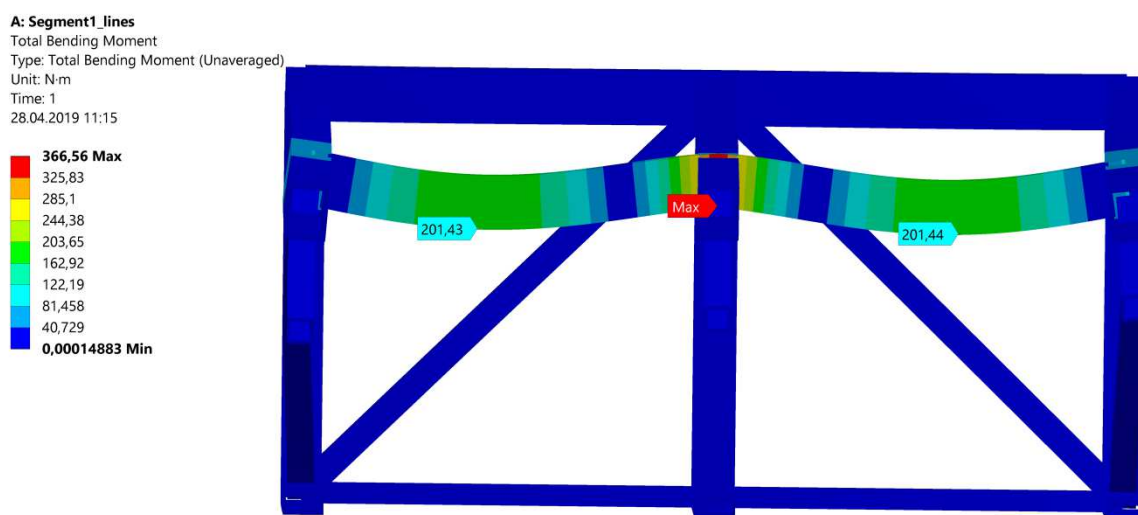
Varianta	Podélník (horní/dolní) [mm]	Příčník [mm]	Vzpěra [mm]	Výztuha [mm]
4.	40x30x2	40x30x2	30x30x2	20x20x2
	30x15x2			

V kapitole č. 4 bude z vybraných ocelových profilů vytvořen model segmentu S1 pomocí skořepinových prvků, na kterém bude provedena podrobnější pevnostní kontrola. Pro ilustraci je na obrázku č. 11 zobrazen průběh ohybového momentu na segmentu S1 a na obrázku č. 12 je detailní pohled na průběh ohybového momentu na příčníku.

Obrázek č. 11: Průběh ohybového momentu na modelu z nosníkových prvků segmentu S1



Obrázek č. 12: Detailní pohled na průběh ohybového momentu zatíženého segmentu S1



## 2.3 Návrh ocelové konstrukce segmentu S4

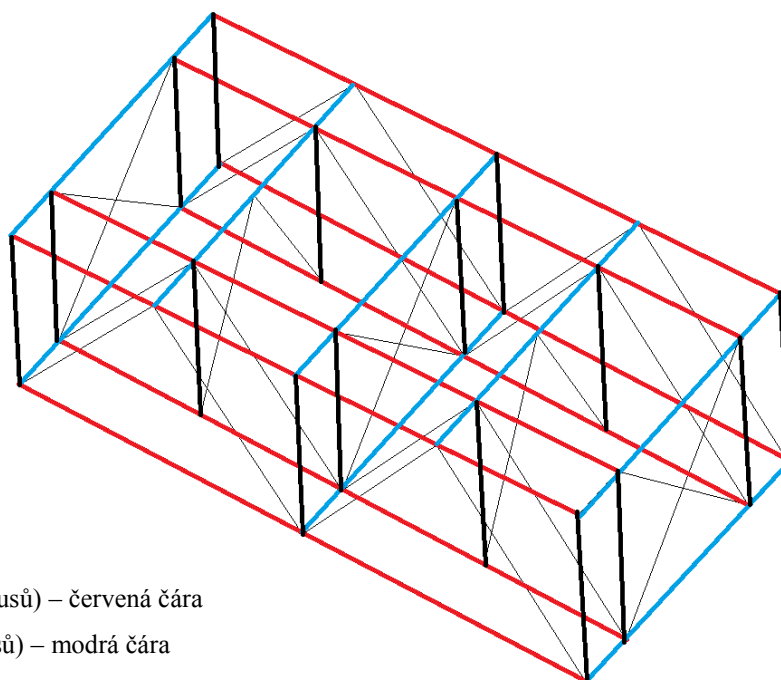
Postup při návrhu ocelové konstrukce segmentu S4 bude proveden stejně jako v případě segmentu S1 s tím rozdílem, že zde navíc bude provedeno zjednodušené analytické řešení. Rovněž bude provedeno pevnostní posouzení testovací konstrukce numericky, a to metodou konečných prvků v prostředí výpočetního programu ANSYS Workbench 18.2.

### 2.3.1 Geometrický model ocelové konstrukce segmentu S4

Konstrukce segmentu S4 byla navržena, stejně jako v případě segmentu S1, jako podélně symetrická a je složena z podélníků, příčníků, kolmých vzpěr na šikmých výztuh.

Geometrický model ocelové konstrukce segmentu S4 je na obrázku č. 13, na kterém jsou jednotlivé prvky barevně odlišeny.

*Obrázek č. 13: Geometrický model ocelové konstrukce segmentu S4*



Legenda:

Podélník (8 kusů) – červená čára

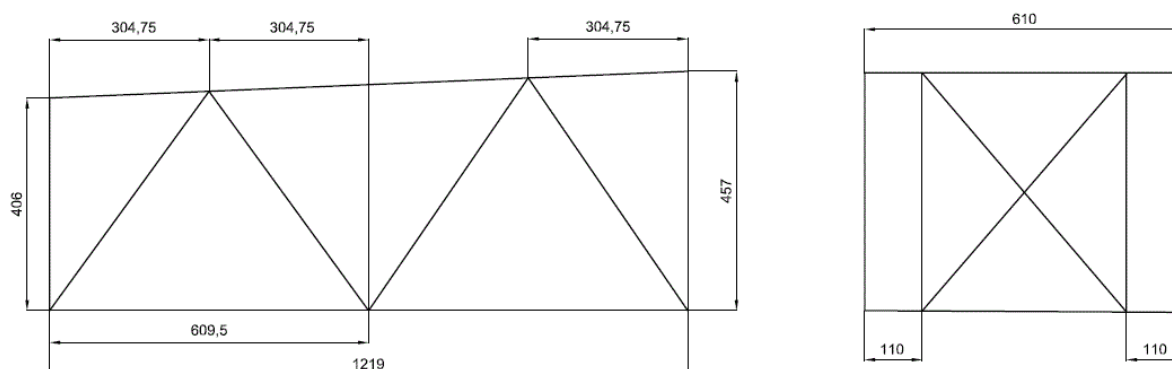
Příčník (8 kusů) – modrá čára

Vzpěra (16 kusů) – černá čára tlustá

Výztuha (26 kusů) – černá čára tenká

Z důvodu lepší představivosti jsou na následujícím obrázku č. 14 zobrazeny základní rozměry segmentu S4. Všechny uvedené rozměry jsou v milimetrech.

*Obrázek č. 14: Základní rozměry segmentu S4*



### 2.3.2 Zjednodušené analytické řešení modelu konstrukce segmentu S4

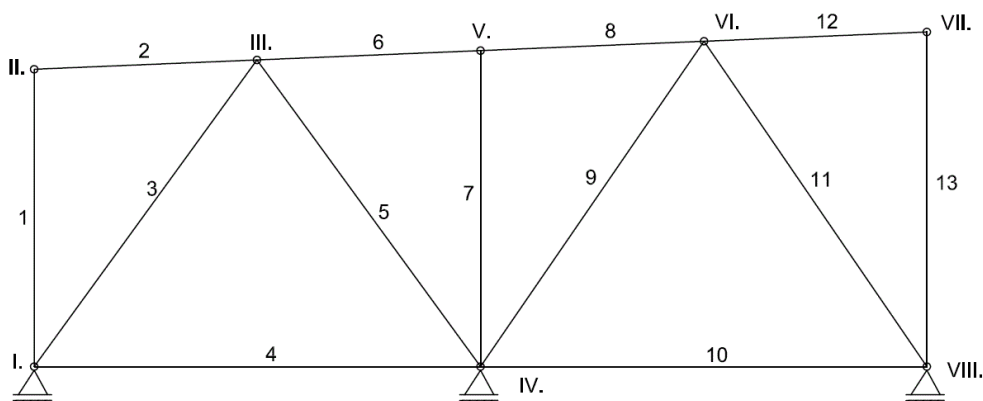
Zjednodušené analytické řešení bude provedeno ve dvou následujících bodech:

1. Statický výpočet prutové konstrukce v rovině.
2. Kontrola nejvíce namáhaných prutů segmentu S4 osovou silou na vzpěr.

#### 2.3.2.1 Statický výpočet prutové konstrukce

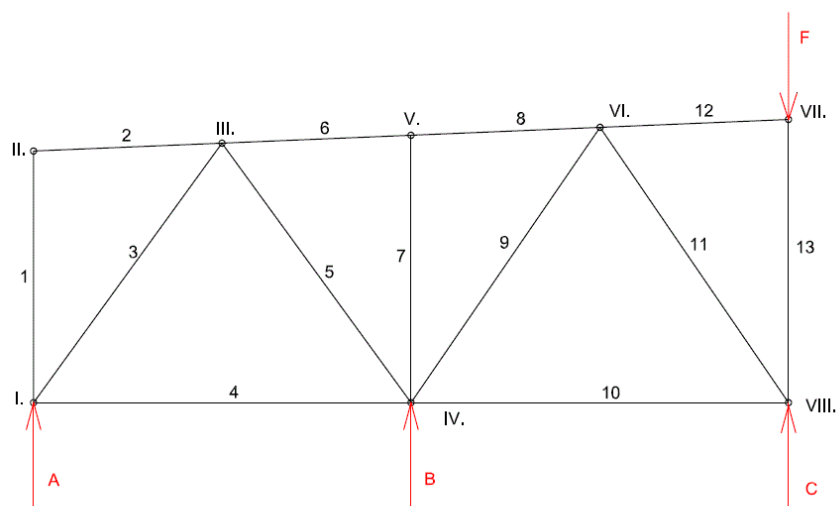
Cílem statického výpočtu je nalezení prutu, ve kterém je nejvyšší hodnota tlakové osově síly. Nejdříve je potřeba očíslovat styčníky a jednotlivé pruty soustavy. Styčníky jsou číslovány římskými číslicemi a pruty jsou číslovány číslicemi arabskými (viz. obrázek č. 15).

Obrázek č. 15: Označení styčníků a prutů soustavy



Dále je nutné provést uvolnění prutové soustavy odstraněním vazeb a jejich nahrazením reakcemi. Zatěžující síla byla umístěná na styčník VII (viz. obrázek č. 16).

Obrázek č. 16: Uvolnění prutové soustavy



Nyní je třeba zjistit vnější a vnitřní statickou určitost.

### **Kontrola vnější statické určitosti**

Pokud počet rovnovážných rovnic odpovídá počtu neznámých vnějších reakcí, je zaručena vnější statická určitost. Jelikož na prutovou soustavu nepůsobí žádné síly v ose x a ani se zde nenachází žádné reakce, můžeme sestavit pouze 2 rovnice rovnováhy. Jednu silovou a jednu momentovou. Statická určitost prutové soustavy se určí podle vzorce

$$i = 2 - m = 2 - 3 = -1 \quad (2.4)$$

kde  $m$  - počet vnějších reakcí odebraných vazbami  
2 - představuje počet rovnovážných rovnic

Můžu konstatovat, že prutová soustava je **1 x vnějšně staticky neurčitá**.

### **Kontrola vnitřní statické určitosti**

Kontrola se provádí podle vzorce:

$$i = 2 \cdot s - p - m = 2 \cdot 8 - 13 - 3 = 0 \quad (2.5)$$

kde  $s$  - počet styčníků  
 $p$  - počet prutů  
 $m$  - počet vnějších reakcí odebraných vazbami

Prutová soustava je **vnitřně staticky určitá**.

### **Výpočet vnějšně staticky neurčité prutové soustavy**

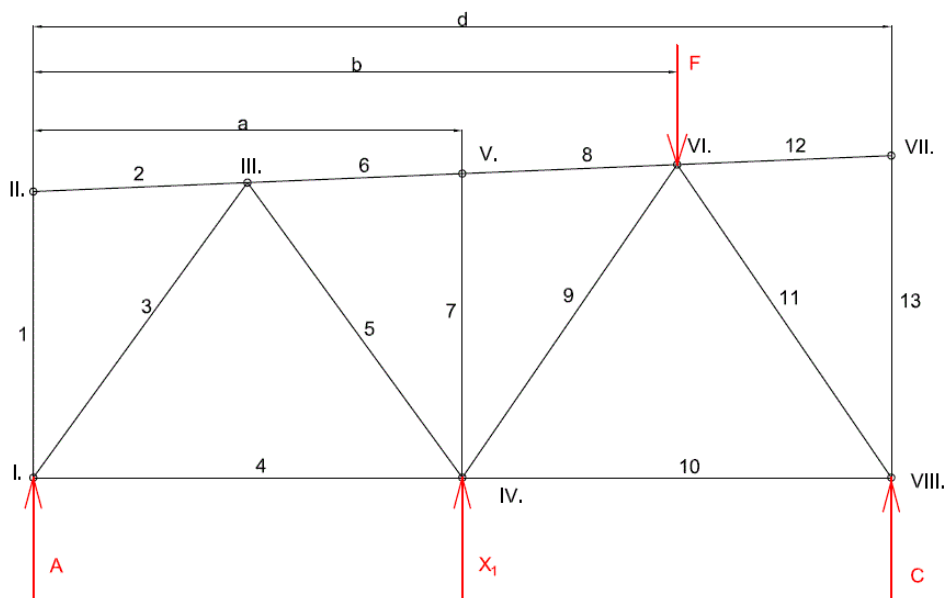
Jestliže síla působí v ose prutu (zde se jedná o pruty 1, 7, 13), přenáší veškerou sílu zatížený prut a ostatní pruty jsou nezatížené a označují se jako nulové. Z toho důvodu bude provedena kontrola na vzpěr prutu č. 13, který je nejdelší a přenáší osovou sílu  $F = 11\,000\text{N}$ .

Nyní je nutné vypočítat osové síly v prutech, jestliže bude prutová soustava zatížená silou ve styčnících III. a VI. V bakalářské práci bude proveden pouze výpočet osových sil v prutech při zatížení silou  $F$  ve styčniku VI.

U staticky neurčité prutové konstrukce se nedají reakce vnějších a vnitřních vazeb a vnitřní síly stanovit z pouhých statických podmínek rovnováhy. K jejich řešení je nutno použít deformačních podmínek. K řešení staticky neurčité prutové konstrukce bude použita silová metoda. Je to metoda přímá, neboť výsledkem řešení jsou statické veličiny[4]. Ve stručnosti bude popsán postup řešení prutové soustavy silovou metodou.

Nejdříve se převede staticky neurčitá úloha na staticky určitou, vytvoříme tzv. základní soustavu. Vazba B se nahradí vnější stykovou výslednicí  $X_1$  a předepíše se deformační podmínka  $w_B = 0$ , která vyjadřuje, že původní kloubová posuvná vazba zamezuje pohybu v ose y (viz. obrázek č. 17) [5] a [6].

Obrázek č. 17: Nahrazení reakce B vnější stykovou výslednicí  $X_1$



#### Sestavení rovnic rovnováhy

$$\sum F_{iy} = 0: A + X_1 + C - F = 0 \quad (2.6)$$

$$\sum M_I = 0: X_1 \cdot a + C \cdot d - F \cdot b = 0 \quad (2.7)$$

#### Výpočet reakcí

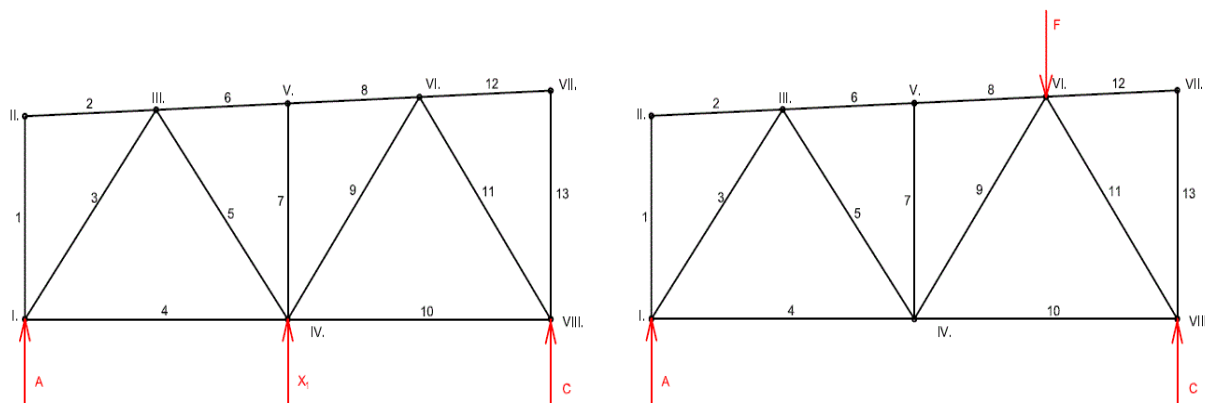
$$C = \frac{F \cdot b - X_1 \cdot a}{d}$$

$$A = F - X_1 - \frac{F \cdot b - X_1 \cdot a}{d}$$

Prutová soustava se nyní rozdělí na dva zatěžovací stavy a to na stav, kdy na ní bude působit pouze zatížení od podvozku vrtulníku  $F$  – představuje nultý zatěžovací (0. stav) a na jednotkový stav (1. stav), kdy na prutovou soustavu působí pouze staticky neurčitá veličina  $X_1$  (bezrozměrné), (viz. obrázek č. 15) [5] a [6]. Pro výpočet je třeba určit zatěžující síly:

- Zatěžující síla pro 0. stav:  $F = 11 \text{ kN}$
- Zatěžující síla pro 1. stav:  $X_1 = 1$

Obrázek č. 18: Rozdělení prutové soustavy na dva zatěžovací stavy



Každý stav je nyní staticky určitý, přičemž síly v prutech vypočítáme styčnickovou metodou pro každý stav samostatně. Vzhledem k rozsahu bakalářské práce zde nebude uveden kompletní výpočet sil v jednotlivých prutech. Výpočet jsem provedl podle postupu [4]. Hodnoty osových sil v každém prutu pro každý stav je uveden v tabulce č. 7, přičemž ve sloupci  $F_{i,0}$  jsou uvedeny velikosti osových sil pro 0. stav a analogicky ve sloupci  $F_{i,1}$  pro 1. stav. Ve sloupci  $L$  jsou uvedeny délky prutů.

Z deformační podmínky  $w_B = 0$  vyjádříme zatěžující sílu  $X_1$  [5] a [6].

$$w_B = 0 \Rightarrow w_{1,1} \cdot X_1 + w_{1,0} = 0 \quad (2.9)$$

$$X_1 = -\frac{w_{1,0}}{w_{1,1}} \quad (2.10)$$

Pro výpočet zatěžující síly je nutné znát deformace jednotlivých stavů, které se vypočítají podle následujících vzorců [5] a [6]:

$$w_{1,0} = \frac{1}{E \cdot S} \cdot \sum_{i=1}^p F_{i,1} \cdot F_{i,0} \cdot L_i \quad (2.11)$$

$$w_{1,1} = \frac{1}{E \cdot S} \cdot \sum_{i=1}^p F_{i,1}^2 \cdot L_i \quad (2.12)$$

Z důvodu zjednodušení výpočtu budu předpokládat, že všechny pruty mají stejný průřez a jsou vyrobeny ze stejného materiálu. Výpočet je uveden v tabulce č. 7

Tabulka č. 7: Výpočet osových sil v prutech

Číslo prutu	$F_{i,0}$ [kN]	$F_{i,1}$ [kN]	$L$ [m]	$F_{i,0} \cdot F_{i,1} \cdot L$	$F_{i,1}^2$	$F_{i,1}^2 \cdot L$	$F_{i,1} \cdot X_1$	$F_i$ [kN]
1	0,0000	0,0000	0,4060	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
2	0,0000	0,0000	0,3053	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
3	-3,3990	-0,6100	0,5190	1,0761	0,3721	0,1931	-2,0701	-5,4691
4	2,0000	0,3590	0,6100	0,4380	0,1289	0,0786	1,2183	3,2183
5	3,2860	-0,5800	0,5190	-0,9892	0,3364	0,1746	-1,9683	1,3177
6	-3,3430	0,7050	0,3053	-0,7195	0,4970	0,1517	2,3925	-0,9505
7	0,0000	0,0000	0,4314	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
8	-3,3430	0,7050	0,3053	-0,7195	0,4970	0,1517	2,3925	-0,9505
9	-3,2070	-0,6400	0,5450	1,1186	0,4096	0,2232	-2,1719	-5,3789
10	5,5650	-0,3370	0,6100	-1,1440	0,1136	0,0693	-1,1437	4,4213
11	<b>-9,9510</b>	<b>0,6030</b>	<b>0,5450</b>	<b>-3,2702</b>	<b>0,3636</b>	<b>0,1982</b>	<b>2,0464</b>	<b>-7,9046</b>
12	0,0000	0,0000	0,3053	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
13	0,0000	0,0000	0,4570	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Suma				-4,210		1,240		

Hodnoty doplňkové síly  $X_1$  vypočítáme podle výše uvedeného vztahu

$$X_1 = -\frac{w_{1,0}}{w_{1,1}} = -\frac{-4,210}{1,240} = 3,395 \text{ kN}$$

Hodnota  $X_1$  vyšla kladná, a proto byl zvolen správný směr.

Hodnoty osových sil v jednotlivých prutech jsou uvedeny v posledním sloupci  $F_i$ .

Prut s největší hodnotou tlakové síly je v tabulce č. 6 v červeném řádku s tučnými číslicemi.

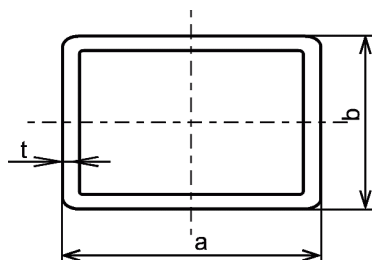
### 2.3.2.2 Kontrola nejvíce namáhaných prutů segmentu S4 osovou silou na vzpěr

Kontrola přímého, štíhlého prutu na vzpěr probíhá v několika postupných krocích. Vzhledem k rozsahu bakalářské práce zde nebude rozepisována teorie, ale v bakalářské práci bude proveden pouze výpočet, přičemž podrobné vysvětlení této problematiky lze získat z dostupné literatury [2]. Kontrolovány na vzpěr budou dva pruty, prut č. 13 a prut č. 11. Nejdříve bude provedena kontrola na vzpěr prutu č. 13, protože je v něm největší osová síla. Dále bude provedena kontrola prutu č. 11, protože je namáhám velkou tlakovou osovou silou a současně je nejdelší.



### Kontrola vzpěru prutu číslo 13

Obrázek č. 19: Základní rozměry ocelového profilu



Vzhledem ke skutečnosti, že předmětem kontroly je ocelový prut čtvercového průřezu, je v následující tabulce č. 8 pouze údaj rozměru  $a$ .

Tabulka č. 8: Vstupní údaje pro výpočet vzpěru prutu č. 13

Vstupní údaje pro výpočet vzpěru	Symbol	Hodnota
Typ uložení prutu podle Eulrovy teorie namáhání prutů na vzpěr		2
Koeficient uložení prutu	$n$	1
Napětí na mezi kluzu	$\sigma_k$	355 MPa
Modul pružnosti v tahu	$E$	$2,1 \cdot 10^5$ MPa
Tloušťka	$t$	2 mm
Rozměr	$a$	25 mm
Materiálová konstanta (pro výpočet kritického napětí podle Tetmajerovy aproximace)	$a$	320 MPa
Materiálová konstanta (pro výpočet kritického napětí podle Tetmajerovy aproximace)	$b$	1,2 MPa

#### Výpočet centrálních kvadratických momentů setrvačnosti

Jelikož se jedná o ocelový prut čtvercového průřezu, jsou centrální kvadratické momenty setrvačnosti k oběma osám shodné.

$$J = \frac{1}{12} \cdot a^4 - \frac{1}{12} \cdot (a - 2 \cdot t)^4 = \frac{1}{12} \cdot 25^4 - \frac{1}{12} \cdot (25 - 2 \cdot 2)^4 \quad (2.13)$$

$$J = 16\,345 \text{ mm}^4$$

#### Výpočet poloměru setrvačnosti

Pro výpočet minimálního poloměru setrvačnosti je nutné znát minimální kvadratický moment setrvačnosti a obsah plochy zvoleného profilu. Jelikož se jedná o ocelový

prut čtvercového průřezu, jsou centrální kvadratické momenty setrvačnosti k oběma osám shodné.

Plochu lze vypočítat podle následujícího vzorce:

$$S = a^2 - (a - 2 \cdot t)^2 = 25^2 - (25 - 2 \cdot 2)^2 = \mathbf{184 \text{ mm}^2} \quad (2.14)$$

$$i_{min} = \sqrt{\frac{J_{min}}{S}} = \sqrt{\frac{16345}{184}} = \mathbf{9,425 \text{ mm}} \quad (2.15)$$

#### Výpočet skutečné a mezní štíhlosti prutu

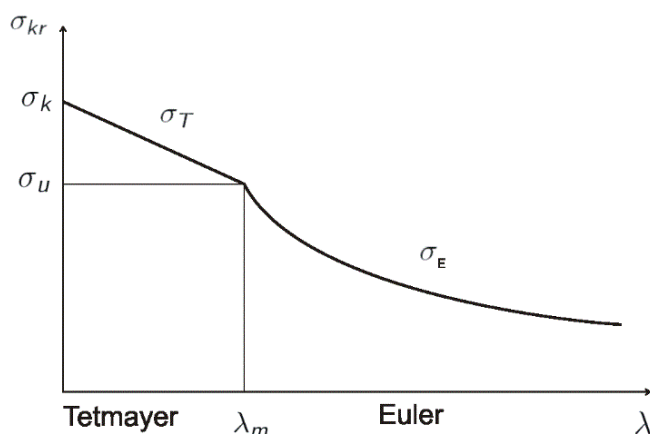
$$\lambda_{sk} = \frac{l}{i_{min}} = \frac{457}{9,425} = \mathbf{48,487} \quad (2.16)$$

$$\lambda_{mez} = \pi \cdot n \cdot \sqrt{\frac{E}{\sigma_k}} = \pi \cdot 1 \cdot \sqrt{\frac{2,1 \cdot 10^5}{355}} = \mathbf{76,409} \quad (2.17)$$

$$\lambda_{sk} < \lambda_{mez} \quad (2.18)$$

Vzhledem ke skutečnosti, že skutečná štíhlost prutu je menší než mezní štíhlost prutu, pohybujeme se v nepružné oblasti (viz. obrázek č. 20). Kritická síla  $F_{kr}$  se vypočítá podle Tetmajerovy aproximace. Nejdříve je nutné provést výpočet kritického napětí  $\sigma_{kr}$ , prostřednictvím kterého se následně vyjádří kritická síla  $F_{kr}$ .

Obrázek č. 20: Závislost kritického napětí na štíhlostním poměru



$$\sigma_{kr} = a - b \cdot \lambda_{sk} = 320 - 1,2 \cdot 48,487 = \mathbf{261,82 \text{ MPa}} \quad (2.19)$$

Jelikož byl zvolen koeficient bezpečnosti  $k = 2,5 - 3$ , je nutno vypočítat sílu pro provozní zatížení prutu  $F$  pro, kterou platí následující vztah, že:

$$F_{kr} = F \cdot k \quad (2.20)$$

$$F_{kr} = \sigma_{kr} \cdot S \quad (2.21)$$

$$F \cdot k = \sigma_{kr} \cdot S$$

$$F = \frac{\sigma_{kr} \cdot S}{k} = \frac{261,82 \cdot 184}{3} = \mathbf{16\,058\,N}$$

$$F \geq F_{13}$$

$$\mathbf{16\,058\,N \geq 11\,000\,N}$$

Prut č. 13 **VYHOVUJE** zadané podmínce bezpečnosti.

### Kontrola vzpěru prutu číslo 11

Postup výpočtu je analogický jako v předchozím případě, a proto zde bude proveden pouze výpočet bez komentáře. Zkoumaný prut je čtvercového průřezu o rozměru  $a = 20\text{mm}$ , tloušťky  $t = 2\text{mm}$  a osová síla v prutu je  $F_{II} = 7904,6\text{N}$  (viz Tabulka č. 6). Ostatní údaje jsou shodné jako při kontrole prutu č. 13.

#### Výpočet centrálních kvadratických momentů setrvačnosti

$$J = \frac{1}{12} \cdot a^4 - \frac{1}{12} \cdot (a - 2 \cdot t)^4 = \frac{1}{12} \cdot 20^4 - \frac{1}{12} \cdot (20 - 2 \cdot 2)^4$$

$$\mathbf{J = 7\,872\,mm^4}$$

#### Výpočet poloměru setrvačnosti

$$S = a^2 - (a - 2 \cdot t)^2 = 25^2 - (25 - 2 \cdot 2)^2 = \mathbf{144\,mm^2}$$

$$i_{min} = \sqrt{\frac{J_{min}}{S}} = \sqrt{\frac{7872}{144}} = \mathbf{7,394\,mm}$$

#### Výpočet skutečné a mezní štíhlosti prutu

$$\lambda_{sk} = \frac{l}{i_{min}} = \frac{545}{7,394} = \mathbf{73,711}$$

$$\lambda_{mez} = \pi \cdot n \cdot \sqrt{\frac{E}{\sigma_k}} = \pi \cdot 1 \cdot \sqrt{\frac{2,1 \cdot 10^5}{355}} = \mathbf{76,409}$$

$$\lambda_{sk} < \lambda_{mez}$$

$$\sigma_{kr} = a - b \cdot \lambda_{sk} = 320 - 1,2 \cdot 73,711 = \mathbf{231,55\,MPa}$$

$$F_{kr} = F \cdot k$$

$$F_{kr} = \sigma_{kr} \cdot S$$

$$F \cdot k = \sigma_{kr} \cdot S$$

$$F = \frac{\sigma_{kr} \cdot S}{k} = \frac{231,55 \cdot 144}{3} = 11\,114\,N$$

$$F \geq F_{11}$$

$$11\,114\,N \geq 7\,905\,N$$

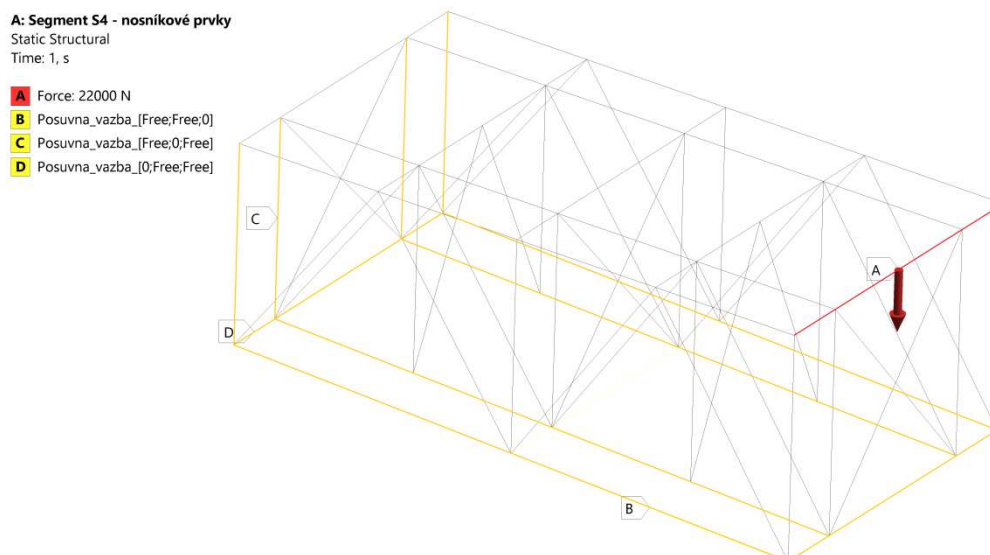
Prut č. 11 **VYHOVUJE** zadané podmínice bezpečnosti.

### 2.3.3 Okrajové podmínky

Volba okrajových podmínek vychází ze stejných předpokladů jako v podkapitole 2.2.2 a z toho důvodu zde již nebudou popisovány. K provedení pevnostní kontroly byly použity následující okrajové podmínky, které jsou zobrazeny na obrázku č. 21:

- A. Zatěžující síla  $F = 22\,000\,N$  byla umístěná na horní příčnici a to v nejvyšším místě segmentu S4.
- B. Posuvná vazba B – odebírání 1° volnosti v ose y
- C. Posuvná vazba C – odebírání 1° volnosti v ose x
- D. Posuvná vazba D – odebírání 1° volnosti v ose z

Obrázek č. 21: Okrajové podmínky modelu segmentu S4 z nosíkových prvků



### 2.3.4 Konečno-prvkový model konstrukce segmentu S4

Model segmentu S4 byl vytvořen, stejně jako v předchozí podkapitole, pomocí nosíkových prvků ve výpočetním programu ANSYS Workbench 18.2. K provedení prvotní

pevnostní kontroly testovacího návrhu konstrukce segmentu S4 byl vytvořen konečno-prvkový model, jehož parametry jsou uvedeny v tabulce č. 9.

*Tabulka č. 9: Parametry konečno-prvkového modelu z nosníků prvků segmentu S4*

Typ elementu	Obdélník
Velikost elementu	5 mm
Počet elementů sítě	7 092
Počet uzlů	14 123

### 2.3.5 Výsledky prvotní pevnostní kontroly návrhu konstrukce segmentu S4

Výsledky z pevnostní kontroly jsou uvedeny v následující tabulce č. 10. Číslo varianty v tabulce č. 10 odpovídá variantě ocelových profilů uvedené v tabulce č. 3.

*Tabulka č. 10: Výsledky z programu ANSYS Workbench 18.2 pro zvolené ocelové profily*

Varianta	Hmotnost $m$ [kg]	Maximální ohybový moment $M_o$ [Nm]	Průřezový modul v ohybu $W_o$ [mm <sup>3</sup> ]	Kvadratický moment setrvačnosti $J_y$ [mm <sup>4</sup> ]	Ohybové napětí $\sigma_o$ [MPa]	Dosažený koeficient bezpečnosti $k$ [-]
1.	62,75	338,38	2 222,93	44 458,7	152,22	2,33
2.	53,43	353,63	1 961,24	29 418,7	180,31	1,97
3.	55,83	323,9	4 064,21	101 605,3	79,70	4,45
4.	50	321,48	2 584,27	51 685,3	124,40	2,85
5.	62,06	366,57	1 961,24	29 418,7	186,91	1,90
6.	48,29	324,45	2 584,27	51 685,3	125,55	2,83

Na základě provedené prvotní pevnostní kontroly jsem se rozhodl pro kombinaci ocelových profilů varianty č. 6 (červený řádek v tabulce č. 10). Pro snadnější orientaci jsou rozměry ocelových profilů vybrané varianty uvedeny v tabulce č. 11.

Tabulka č. 11: Rozměry ocelových profilů zvolené varianty pro konstrukci segmentu S4

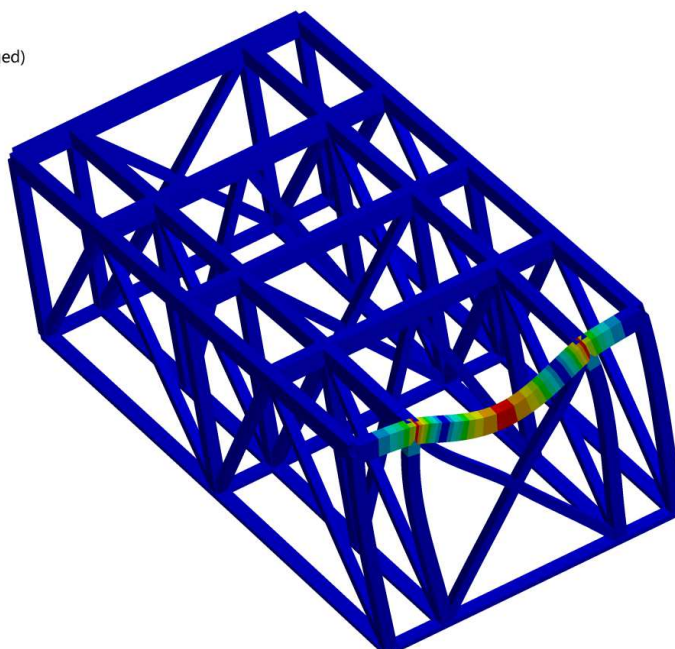
Varianta	Podélník, příčník (Horní/spodní) [mm]	Vzpěra [mm]	Výztuha [mm]
6.	40x25x2	25x25x2	20x20x2
	30x10x2		

Pro ilustraci je na následujících obrázcích č. 22 a č. 23 zobrazen průběh ohybového momentu.

Obrázek č. 22: Průběh ohybového momentu na modelu z nosíkových prvků segmentu S4

**A: Static Structural**  
Total Bending Moment  
Type: Total Bending Moment (Unaveraged)  
Unit: N-m  
Time: 1  
28.04.2019 11:36

322,89 Max  
287,01  
251,13  
215,26  
179,38  
143,5  
107,63  
71,752  
35,876  
6,1734e-5 Min



Obrázek č. 23: Detailní pohled na průběh ohybového momentu zatíženého nosníku

**A: Static Structural**

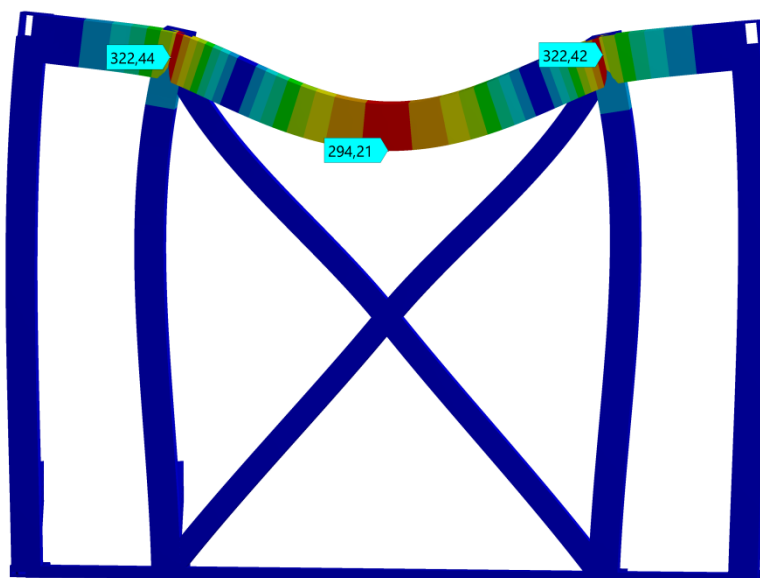
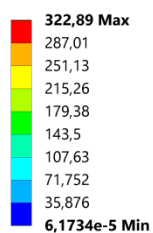
Total Bending Moment

Type: Total Bending Moment (Unaveraged)

Unit: N-m

Time: 1

28.04.2019 11:32



### 3 NÁVRH MODELU POJEZDOVÉHO PLECHU K PROVEDENÍ PEVNOSTNÍ KONTROLY SEGMENTŮ NÁJEZDOVÉ RAMPY

Pro pojezdovou plochu jsem zvolil děrovaný ocelový pojezdový plech s protiskluzovým povrchem (s prolisy). Prolisy v plechu zamezují nežádoucímu nekontrolovatelnému sklouznutí vrtulníku po nakloněné rovině nájezdové rampy během nakládání (vykládání). Prolisy na pojezdovém plechu představují velké množství koncentrátorů napětí, které nemají na pevnostní analýzu vliv, a proto jsem se rozhodl pro zjednodušení úlohy. Před provedením samotné pevnostní analýzy bylo nutné provést vyčištění geometrického modelu pojezdového plechu s prolisy. Z toho důvodu byl proveden návrh modelu pojezdového plechu bez prolisů a to s parametry odpovídajícími pojezdovému plechu s prolisy.

V programu ANSYS Workbench 18.2 jsem vymodeloval desku pojezdového plechu o rozměrech 295x265 mm s prolisy, jejichž rozměry jsou shodné jako ve skutečnosti. Pojezdový plech s prolisy je vyroben z konstrukční oceli a tomu odpovídaly i zadané hodnoty hustoty a modulu pružnosti v tahu ve výpočetním programu. Hmotnost desky byla zjištěna v tomtéž výpočetním programu. Abychom dostali výsledky odpovídající skutečnosti, bylo nutné vypočítat hustotu a zjistit modul pružnosti v tahu pro model pojezdového plechu pro pevnostní analýzu konstrukce nájezdové rampy bez prolisů. Rozměry modelu pojezdového plechu měly tyto rozměry (d x š x v) 295x265x5,5. Hustota modelu pojezdového plechu byla stanovena na základě následujícího výpočtu.

#### Výpočet hustoty a modulu pružnosti plechu pro pevnostní analýzu

$$V_{model} = d \cdot š \cdot v = 295 \cdot 265 \cdot 5,5 = 4,3 \cdot 10^{-4} m \quad (3.1)$$

$$\rho_{model} = \frac{m}{V_{model}} = \frac{1,96}{4,3 \cdot 10^{-4}} = 4\,559 \, kg \cdot m^{-3} \quad (3.2)$$

Na základě zjištění velikosti hustoty modelu pojezdového plechu pro pevnostní analýzu a znalosti průhybu pojezdového plechu s prolisy bylo možné najít hodnotu modulu pružnosti v tahu modelu pojezdového plechu pro pevnostní analýzu. Zvolil jsem metodu pokusu, který jsem prováděl ve výpočetním programu ANSYS Workbench 18.2. V uvedeném programu jsem měnil hodnoty modulu pružnosti v tahu pro model pojezdového plechu, a to tak dlouho, dokud hodnoty průhybu obou plechů nebyly shodné.

Pro nalezení odpovídajícího modulu pružnosti bude postupováno následujícím způsobem. Nejdříve budou stanoveny okrajové podmínky, které jsou shodné pro oba plechy, jsou zobrazeny na obrázku č. 24.



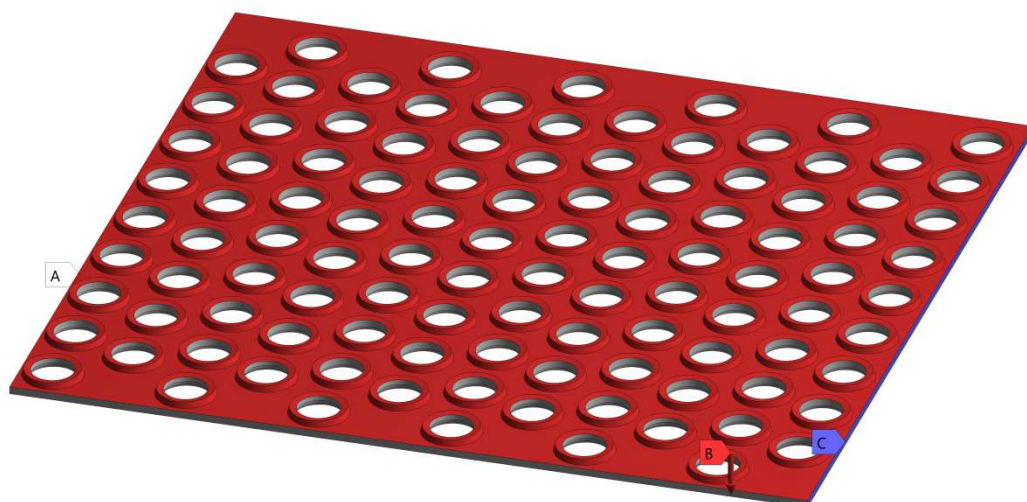
Obrázek č. 24: Okrajové podmínky pojezdových plechů

**A: Plech\_s\_prolisy**

Static Structural

Time: 1, s

- A Vetknutí
- B Force: 5000, N
- C Vetknutí\_2

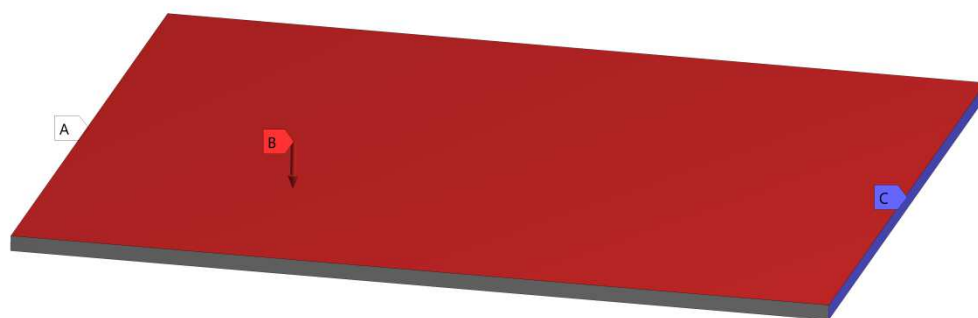


**D: Model\_plechu**

Static Structural

Time: 1, s

- A Vetknutí
- B Force: 5000, N
- C Vetknutí\_2



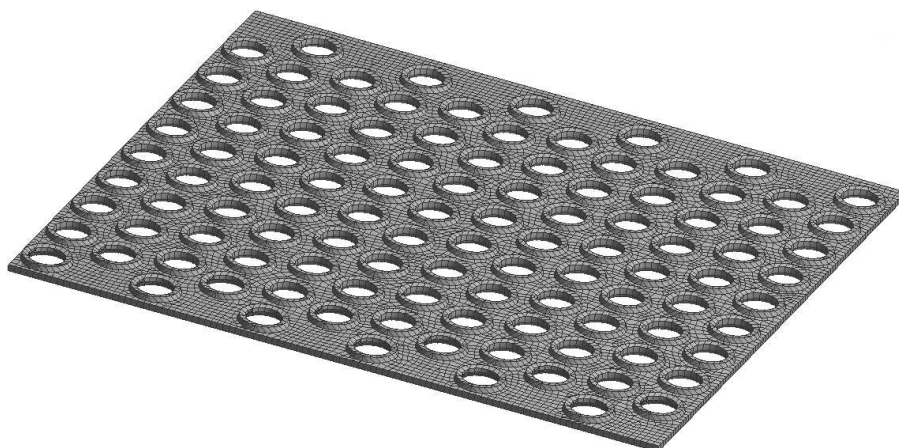
Následně byly vytvořeny konečno-prvkové modely obou plechů, jejichž parametry jsou uvedeny v tabulce č. 12. Pro přehlednost jsou konečno-prvkové modely pojezdových plechů zobrazeny na obrázku č. 25.

Tabulka č. 12: Parametry konečno-prvkového modelu pojezdového plechu

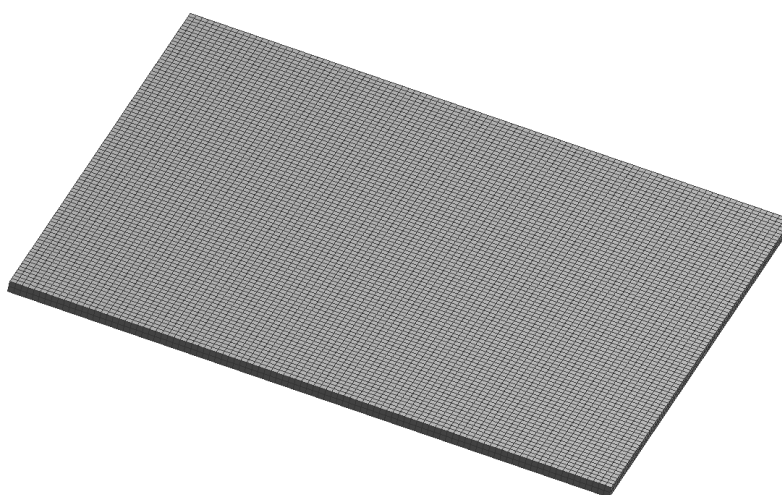
	Model pojezdového plechu s prolisy	Model pojezdového plechu pro pevnostní analýzu
Typ elementu	Čtverec	Čtverec
Velikost elementu	3 mm	3 mm
Počet elementu sítě	48 317	17 622
Počet uzlů	147 663	98 430

Obrázek č. 25: Zobrazení konečno- prvkové sítě pojezdových plechů

a) S prolisy



b) Bez prolisů

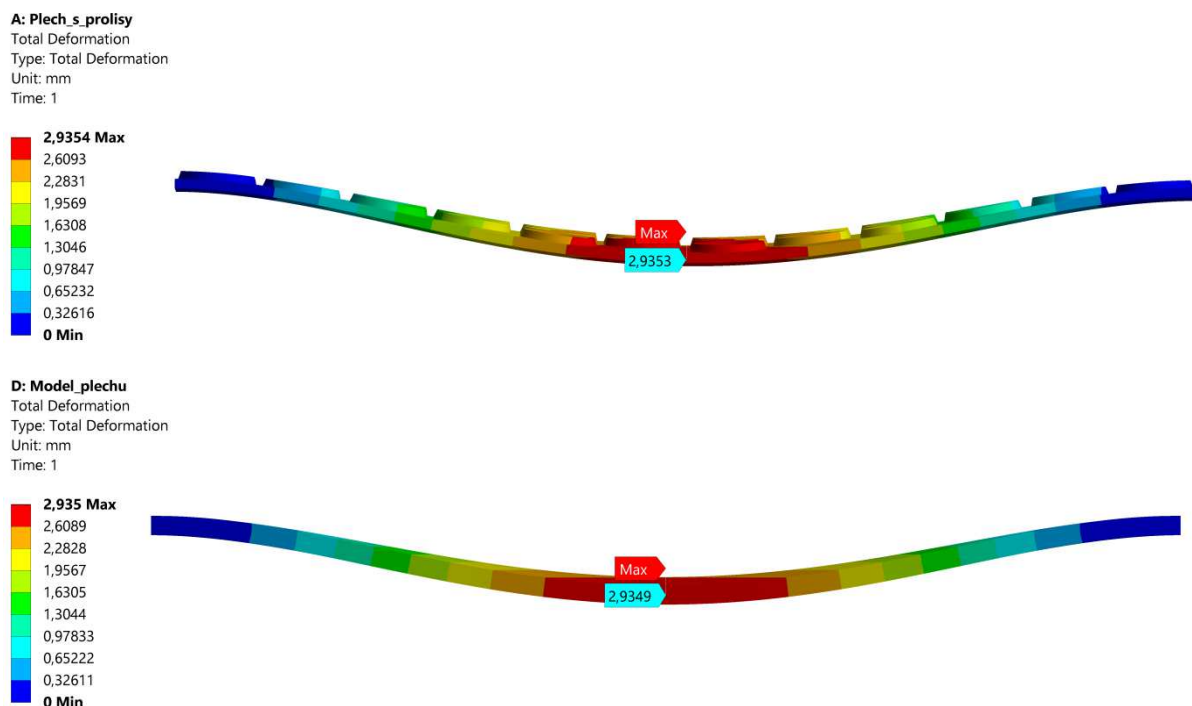


Výše uvedeným postupem byla zjištěna hodnota modulu pružnosti modelu plechu pro pevnostní analýzu, která je:

$$E_{náhr} = 31,6 \text{ GPa}$$

Při pohledu na níže uvedený obrázek č. 26 je vidět, že hodnoty průhybu obou pojezdových plechů jsou si rovné, a proto je navržený model pojezdového plechu vhodný k provedení pevnostní analýzy segmentů nájezdové rampy S1 a S4.

Obrázek č. 26: Vzájemné porovnání průhybů desek pojezdových plechů



Pro lepší přehlednost, orientaci a vzájemné porovnání fyzikálních parametrů obou pojezdových plechů jsou jejich hodnoty uvedeny v následující tabulce č. 13.

Tabulka č. 13: Fyzikální parametry pojezdových plechů

Fyzikální vlastnosti	Jednotky	Pojezdový plech s prolisy	Model pojezdového plechu pro pevnostní analýzu
Rozměry desky	mm	295x26 x5,5	295x265x5,5
Hmotnost	kg	1,96	1,96
Materiál	-	S235	Abstraktní model
Hustota	kg·m <sup>-3</sup>	7 850	4 559
Modul pružnosti v tahu	MPa	2,1·10 <sup>5</sup>	0,316·10 <sup>5</sup>
Poissonovo číslo	-	0,3	0,3

## 4 PEVNOSTNÍ KONTROLA SEGMENTŮ S1 A S4 POMOCÍ SKOŘEPINOVÝCH PRVKŮ

Ve druhé kapitole byl proveden výběr vhodných profilů pro konstrukci segmentů nájezdové rampy S1 a S4. V této kapitole budou z vybraných ocelových profilů vytvořeny skořepinové modely výše uvedených segmentů a bude provedena jejich pevnostní kontrola. K pevnostní kontrole byly použity shodné okrajové podmínky jako ve druhé kapitole. Pevnostní kontrolou skořepinových modelů prvotně navržených konstrukcí segmentů S1 a S4 bylo zjištěno, že ani jedna z konstrukcí nesplňovala požadovaný koeficient bezpečnosti. A proto bylo nutné provést jejich konstrukční úpravu a následnou pevnostní kontrolu. Vzhledem k rozsahu bakalářské práce byla provedena pouze jedna úprava každého ze segmentů. Pevnostní kontrola upravených konstrukcí probíhala v následujících krocích:

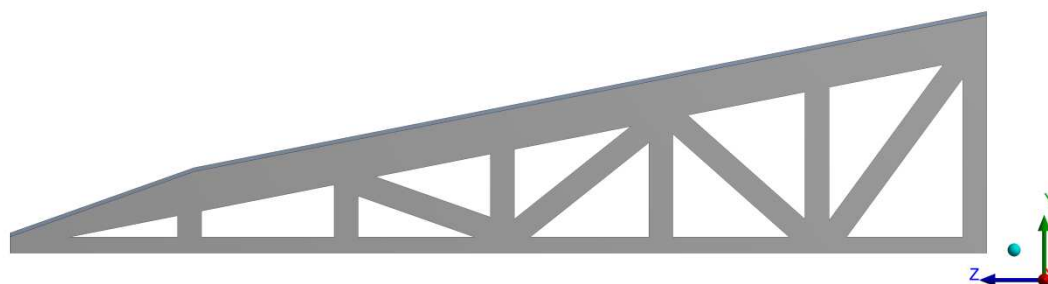
1. Úprava konstrukce segmentu S1.
2. Úprava konstrukce segmentu S4.
3. Stanovení okrajových podmínek pro pevnostní kontrolu segmentů S1 a S4.
4. Tvorba konečno-prvkového modelu segmentů S1 a S4.
5. Pevnostní kontrola finální konstrukce segmentů S1 a S4.
6. Vyhodnocení pevnostní kontroly.

### 4.1 Úprava konstrukce segmentu S1

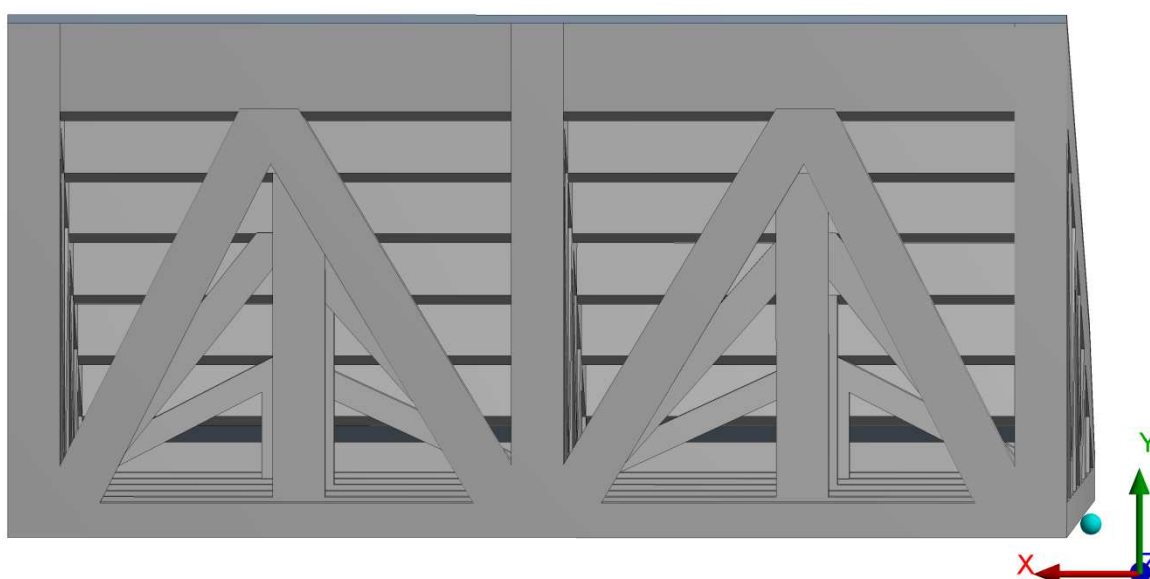
Jak už bylo zmíněno v úvodu kapitoly, maximální hodnota redukovaného napětí nesplňovala podmínku bezpečnostního koeficientu a bylo nutné provést optimalizaci konstrukce segmentu S1. Maximální hodnota redukovaného napětí byla  $\sigma_{red} = 195,67 \text{ MPa}$  a koeficient bezpečnosti byl  $k = 1,81$ , což neodpovídá vstupní podmínce. Úprava segmentu spočívala ve zvýšení počtu kolmých a šikmých vzpěr. Cílem bylo snížit velikost průhybů zatížených prutů, a tím docílit snížení hodnot redukovaných napětí v kritických místech. Původně navržené šikmé výztuhy o rozměrech 20x20x2 mm byly nahrazeny výztuhami 30x30x2 mm. Modifikovaná konstrukce je zobrazena na obrázku č. 27.

Obrázek č. 27: Modifikovaná konstrukce segmentu S1

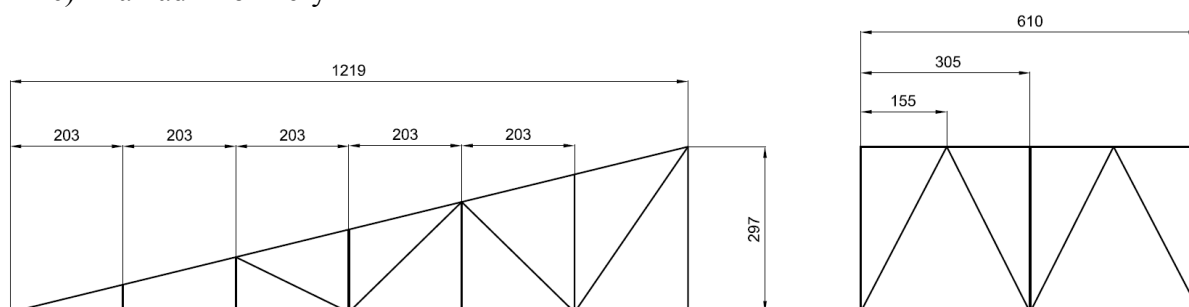
a) Boční pohled



b) Čelní pohled



c) Základní rozměry



## 4.2 Úprava konstrukce segmentu S4

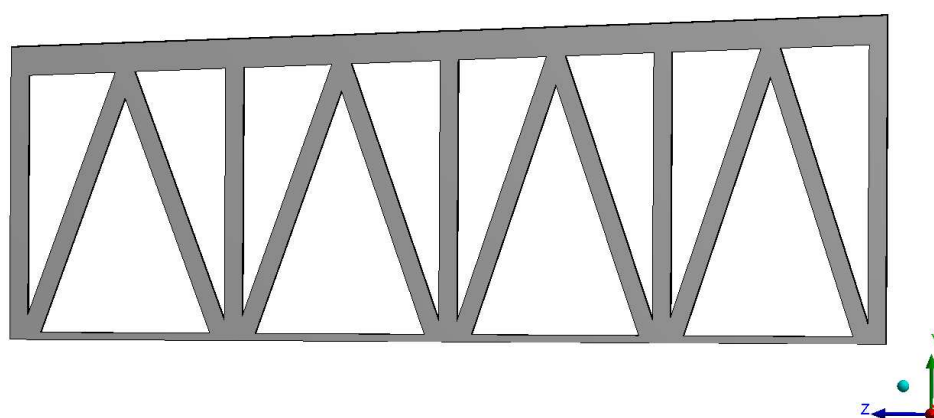
Pevnostní analýzou původně navržené konstrukce segmentu S4 ve 2. kapitole jsem zjistil, že velikost maximálního redukovaného napětí dosahovala hodnot, které neodpovídaly stanovenému bezpečnostními koeficientu. Maximální hodnota redukovaného napětí byla

$\sigma_{red} = 239,86 \text{ MPa}$  a koeficient bezpečnosti byl  $k = 1,48$ , což neodpovídá vstupní podmínce. Na základě zjištění této skutečnosti bylo nutné provést modifikaci konstrukce segmentu S4, přičemž byly použity původně zvolené ocelové profily.

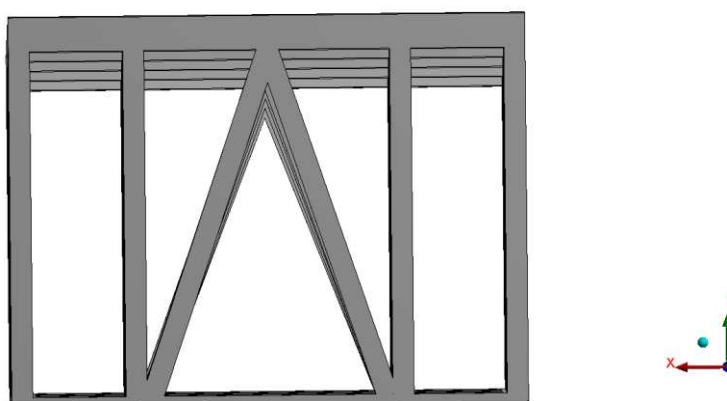
Úprava konstrukce segmentu S4 spočívala ve zdvojnásobení počtu šikmých výztuh a přidáním dvou vzpěr na bocích segmentu. Dále byla nahrazena vnitřní výztuha ve tvaru písmena „X“ za výztuhu ve tvaru obráceného „V“. Modifikovaná konstrukce je zobrazena na obrázku č. 28.

Obrázek č. 28: Modifikovaná konstrukce segmentu S4

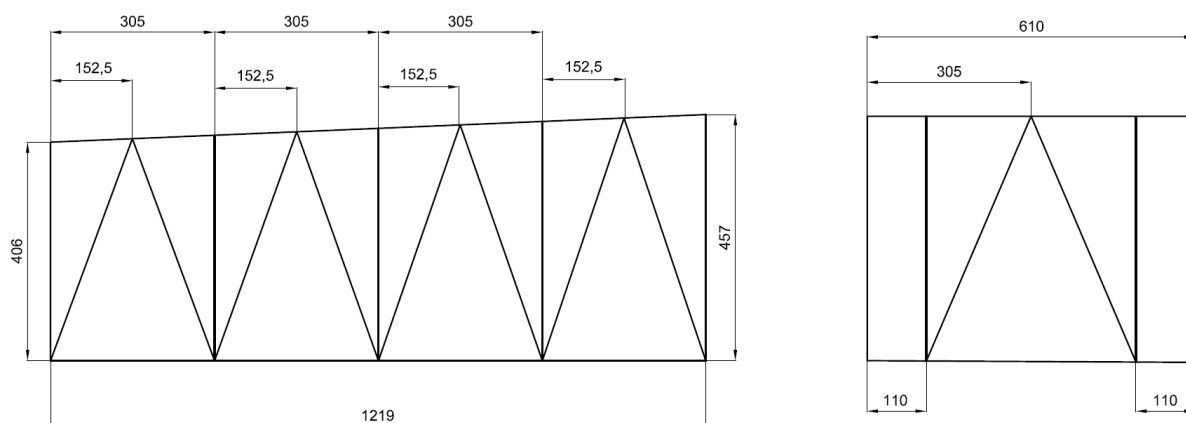
a) Boční pohled



b) Čelní pohled



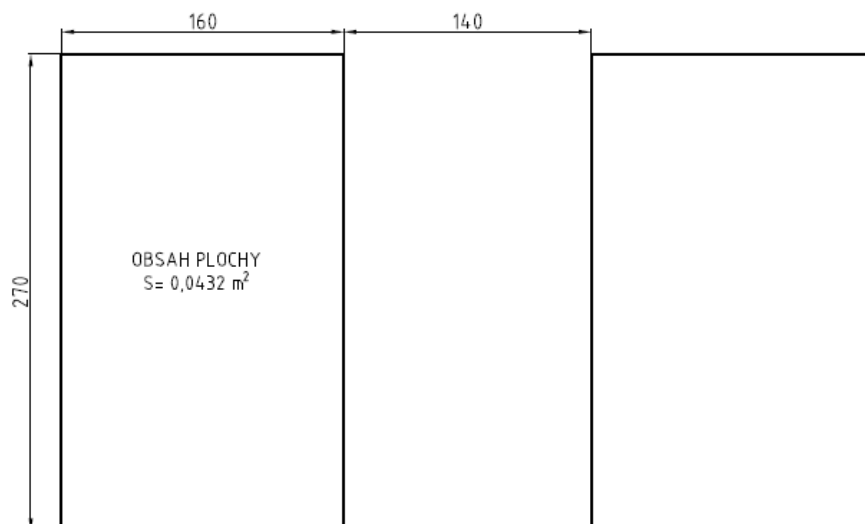
### c) Základní rozměry



## 4.3 Stanovení okrajových podmínek pro pevnostní kontrolu segmentů S1 a S4

V této podkapitole budou určeny okrajové podmínky pro pevnostní kontrolu finální konstrukce obou segmentů nájezdové rampy. Jak bylo uvedeno v 1. kapitole, předový podvozek je dvoukolový a nese váhu 2200 kg z celkové hmotnosti vrtulníku. K provedení relevantní pevnostní kontroly je nutné znát vzájemnou polohu kol předového podvozku a jejich polohu na nájezdové rampě. Plocha, kterou podvozek bude působit na podlahu nájezdové rampy, představuje dva obdélníky o rozměrech 270x160 mm se vzdáleností mezi koly 140 mm (viz Obrázek č. 29).

Obrázek č. 29: Půdorys kol předového podvozku



#### 4.3.1 Okrajové podmínky konstrukce segmentu S1

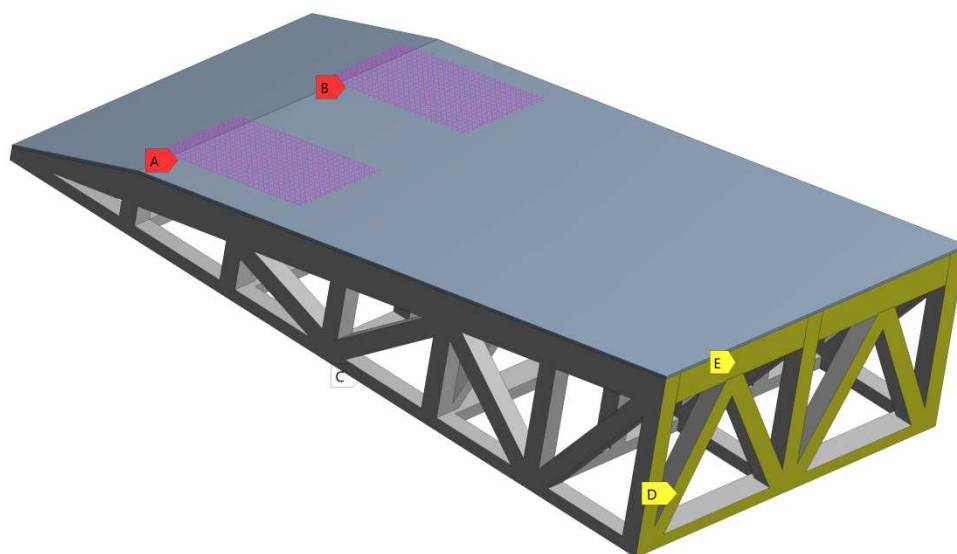
K provedení pevnostní kontroly segmentu S1 byly použity následující okrajové podmínky, které jsou zobrazeny na obrázku č. 30:

- A. Zatěžující síla od levého kola  $F_{LPK} = 11\,000\text{ N}$ .
- B. Zatěžující síla od pravého kola  $F_{PPK} = 11\,000\text{ N}$ .
- C. Posuvná vazba B – odebírání 1°volnosti v ose y.
- D. Posuvná vazba C – odebírání 1°volnosti v ose z.
- E. Posuvná vazba D – odebírání 1°volnosti v ose x.

Obrázek č. 30: Okrajové podmínky finální konstrukce segmentu S1

**B: Segment S1 - Final**  
Static Structural  
Time: 1, s

- A** Right\_Wheel: 11000 N
- B** Left\_Wheel: 11000 N
- C** Posuvna\_vazba\_[Free;0;Free]
- D** Posuvna\_vazba\_[Free;Free;0]
- E** Posuvna\_vazba\_[0;Free;Free]



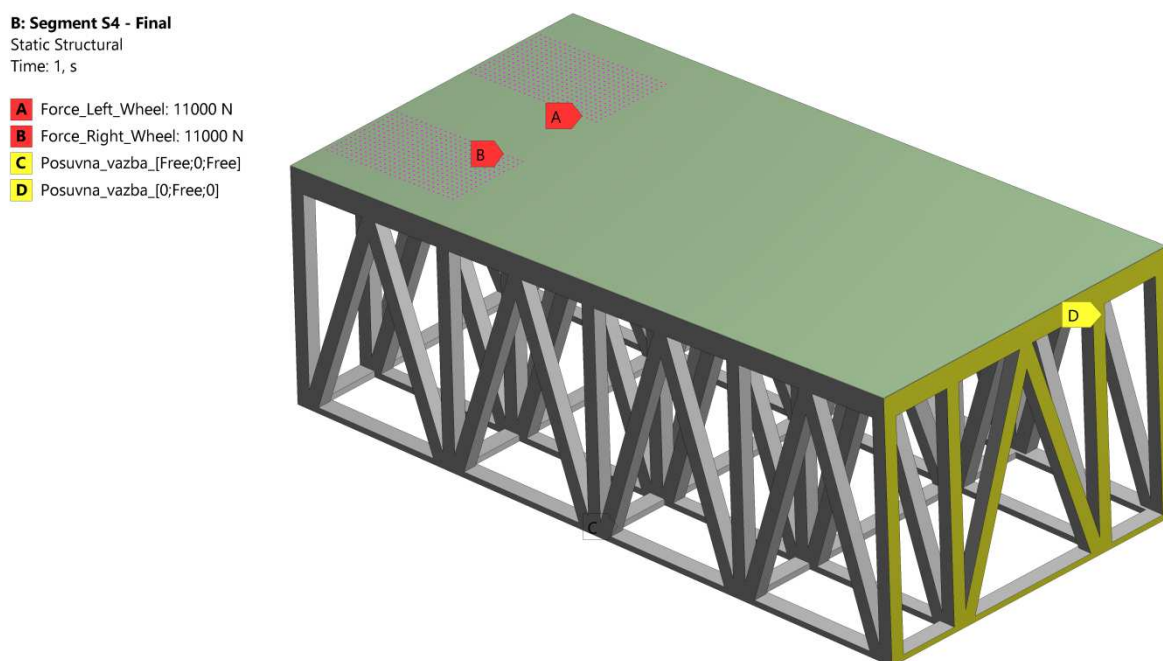


#### 4.3.2 Okrajové podmínky konstrukce segmentu S4

K provedení pevnostní kontroly segmentu S4 byly použity následující okrajové podmínky, které jsou zobrazeny na obrázku č. 31:

- A. Zatěžující síla od levého kola  $F_{LPK} = 11\,000\text{ N}$ .
- B. Zatěžující síla od pravého kola  $F_{PPK} = 11\,000\text{ N}$ .
- C. Posuvná vazba B – odebírání 1° volnosti v ose y.
- D. Posuvná vazba D – odebírání 2° volnosti a to v ose z a v ose x.

Obrázek č. 31: Okrajové podmínky finální konstrukce segmentu S4



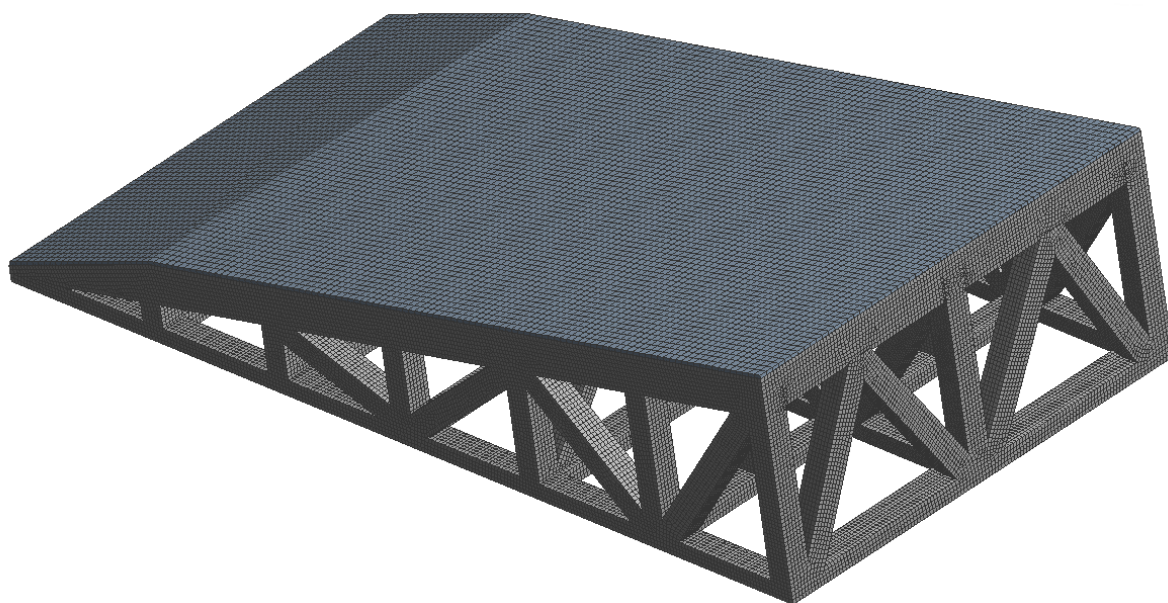
#### 4.4 Tvorba konečno-prvkového modelu segmentů S1 a S4

Konstrukce segmentů byly vytvořeny skořepinovými prvky a pojezdový plech byl vytvořen jako pevné těleso. K provedení pevnostní kontroly byl použit model pojezdového plechu, který byl vytvořen ve 3. kapitole. K provedení pevnostní kontroly byly vytvořeny konečno-prvkové modely segmentů S1 a S4, jejichž parametry jsou uvedeny v tabulce č. 14 a pro názornost jsou konečno-prvkové modely segmentů S1 a S4 zobrazeny na obrázcích č. 32 a č. 33.

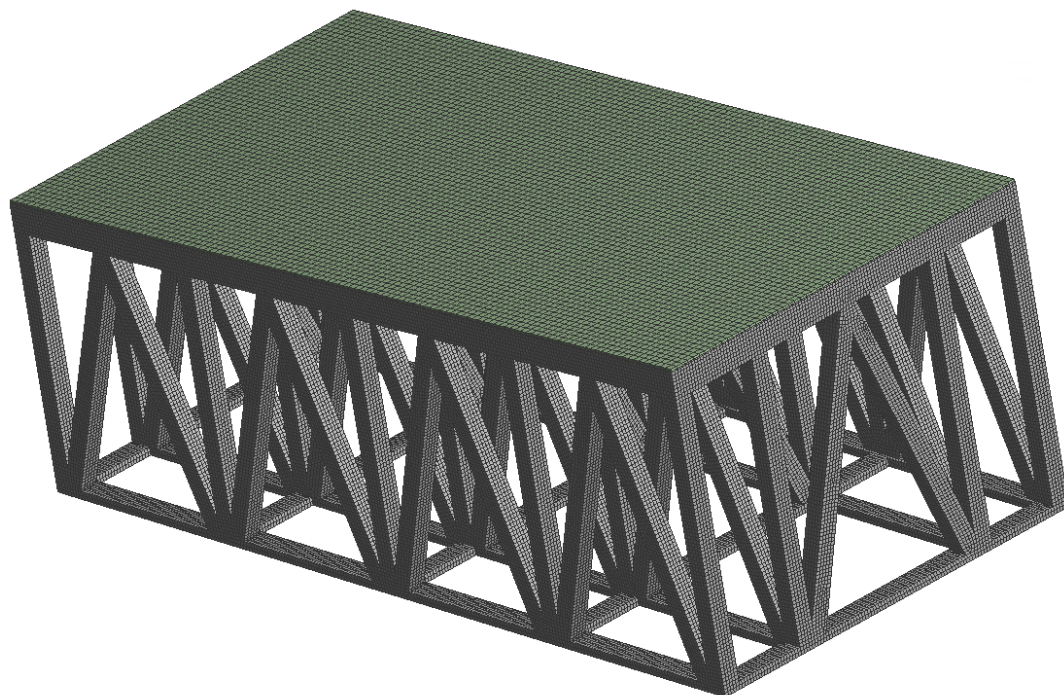
Tabulka č. 14: Parametry konečno-prvkových modelů segmentů S1a S4

	Segment S1	Segment S4
Typ elementu	Čtverec	Čtverec
Velikost elementu:		
- Konstrukce	5 mm	5 mm
- Pojezdový plech	10 mm	10 mm
Počet elementů sítě	130 404	164 332
Počet uzlů	158 953	162 336

Obrázek č. 32: Konečno- prvkový model finální konstrukce segmentu nájezdové rampy S1



Obrázek č. 33: Konečno-prvkový model finální konstrukce segmentu S4



#### 4.5 Pevnostní kontrola segmentů S1 a S4 nájezdové rampy

K hodnověrnému pevnostnímu posouzení konstrukce segmentu nájezdové rampy bylo nutné vyhledat místo, ve kterém redukované napětí dosahuje maximální hodnoty. K nalezení místa s nevyšší hodnotou redukovaného napětí jsem zvolil metodu postupného zatěžování plochy segmentu, a to v krocích prováděných po 50 mm. Rozměry zatěžovacího obrazce odpovídaly půdorysným rozměrům kol příďového podvozku, tak jak byly uvedeny v podkapitole 4.2 Stanovení okrajových podmínek (viz Obrázek č. 29).

Pevnostní kontrola probíhala u obou segmentů podle stejného postupu. Po každém zatížení jsem zaznamenal maximální hodnotu redukovaného napětí a po zatížení celé plochy segmentu jsem údaje vyhodnotil. Hodnoty jednotlivých maximálních redukovaných napětí jsem zaznamenal do grafu. Jelikož se nejednalo o plynulý posun, provedl jsem interpolaci dvou sousedících bodů přímkou.

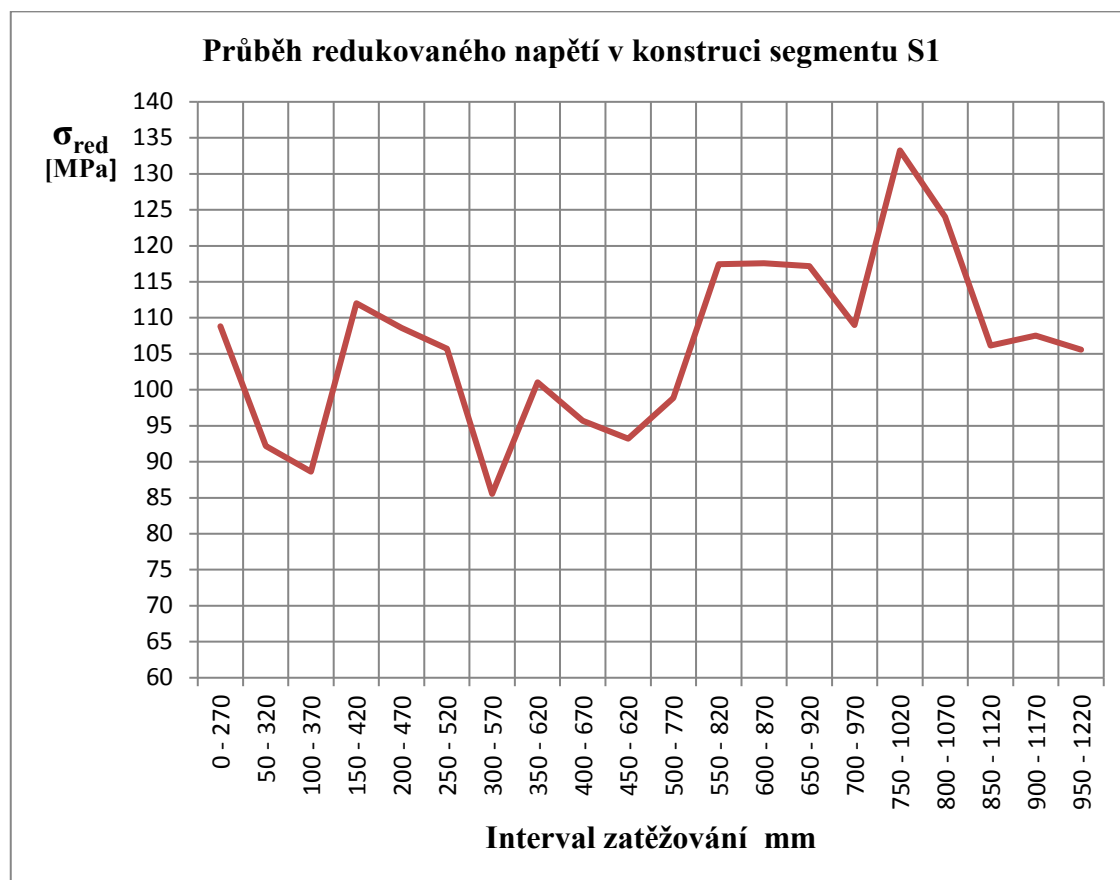
Jelikož k provedení pevnostní kontroly byl použit model pojezdového plechu, nebudou zde uvedeny hodnoty redukovaného napětí na pojezdovém plechu.

##### 4.5.1 Pevnostní kontrola konstrukce segmentu S1 nájezdové rampy

Na obrázku č. 34 je uveden graf, na kterém je zachycen průběh maximálních hodnot redukovaného napětí, zjištěný postupným zatěžováním segmentu S1 a jeho hodnota je  $\sigma_{redS1} = 133,25 \text{ MPa}$ . V grafu je vidět, že nejvyšší hodnota redukovaného napětí byla

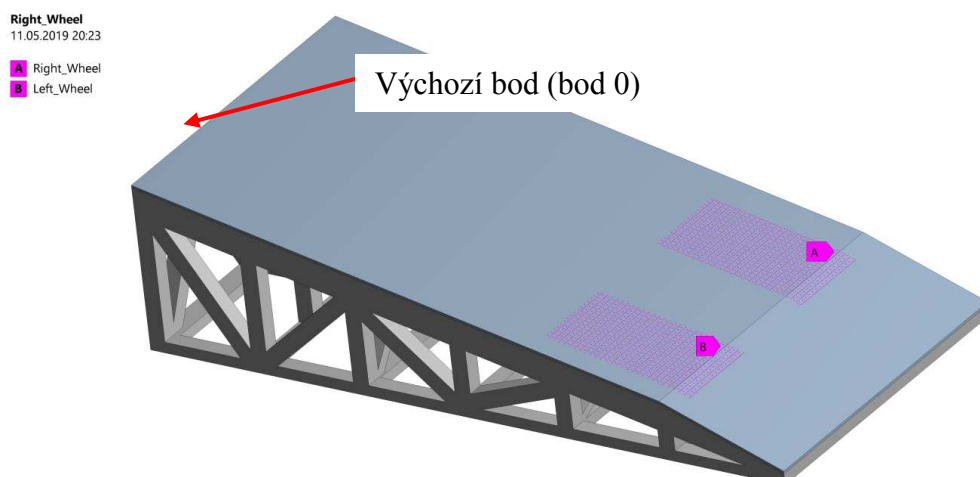
dosažena v úseku 750 - 1020 mm od okraje segmentu S1. Konkrétní hodnoty redukovaného napětí a velikosti průhybů konstrukce segmentu S1 v jednotlivých úsecích jsou uvedeny v Příloze A.

Obrázek č. 34: Průběh maximálního redukovaného napětí v konstrukci segmentu S1



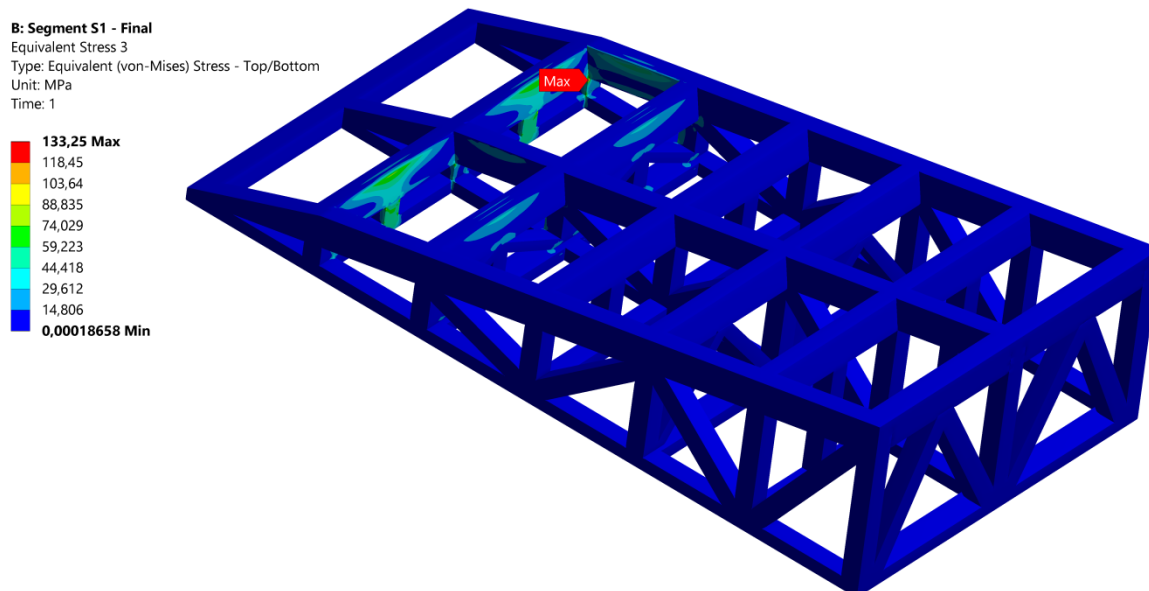
Pro názornost je na obrázku č. 35 zobrazen segment S1 s vyznačením polohy kol předového podvozku, kde byla dosažena maximální hodnota redukovaného napětí.

Obrázek č. 35: Zobrazení polohy kol předového podvozku, kde hodnota redukovaného napětí dosahuje maximální hodnoty na segmentu S1

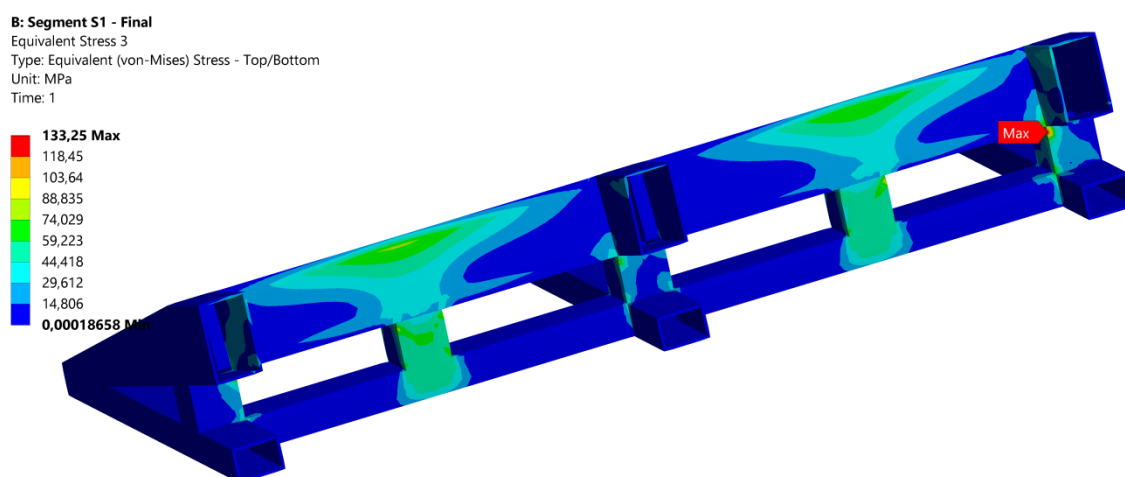


Na obrázcích č. 36 a č. 37 je zobrazen průběh redukovaného napětí v konstrukci segmentu S1. Pro lepší názornost je zobrazena pouze konstrukce bez pojezdového plechu.

*Obrázek č. 36: Celkový pohled na segment S1s vyznačeným místem s maximální hodnotou redukovaného napětí*



*Obrázek č. 37: Příčný řez segmentem S1 s vyznačeným místem s maximální hodnotou redukovaného napětí*



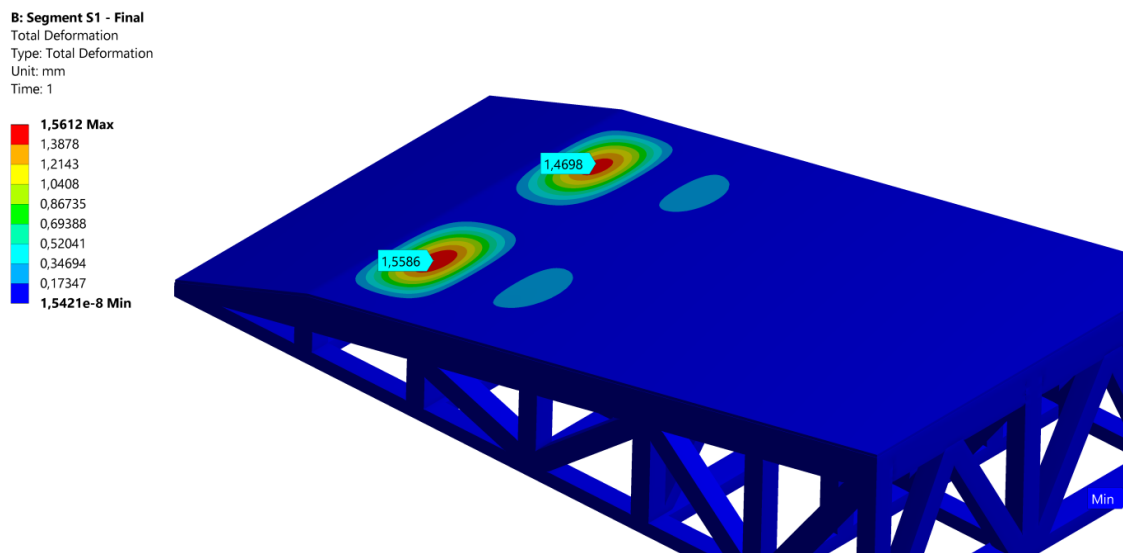
Vzhledem ke skutečnosti, že na konstrukci nájezdové rampy bude použita ocel S355J0, bude výsledná bezpečnost  $k$  pro redukované napětí  $\sigma_{red} = 133,25 \text{ MPa}$  je:

$$k = \frac{R_e}{\sigma_{red}} = \frac{355}{133,25} = 2,66 \quad (4.1)$$

kde  $R_e$  je mez kluzu pro konstrukční ocel S355J0

Pro doplnění pevnostní kontroly jsou na obrázku č. 38 zobrazeny velikosti průhybů pojezdového plechu po zatížení příďovým podvozkem vrtulníku. Maximální průhyb pojezdového plechu je 1,56 mm.

Obrázek č. 38: Velikost průhybu pojezdového plechu segmentu S1

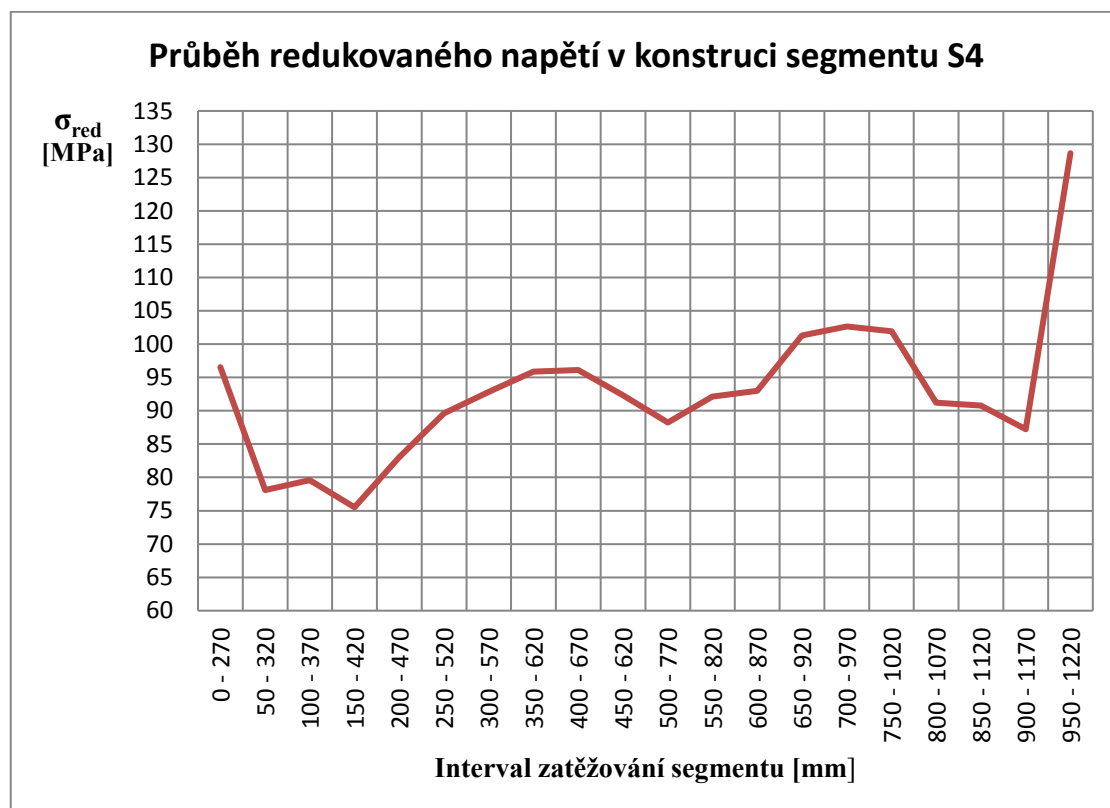


#### 4.5.2 Pevnostní kontrola konstrukce segmentu S4 nájezdové rampy

Nyní bude provedena pevnostní kontrola konstrukce nájezdové rampy segmentu S4, která bude provedena shodně jako v předešlém případě. Na obrázku č. 39 je uveden graf, na kterém je zachycen průběh maximálních hodnot redukovaného napětí, zjištěný postupným zatěžováním segmentu S4 a jeho hodnota je  $\sigma_{redS1} = 128,66 \text{ MPa}$ . V grafu je vidět, že nejvyšší hodnota redukovaného napětí byla dosažena v úseku 950 – 1220 mm od okraje segmentu S4. Maximální hodnoty redukovaného napětí bylo dosaženo v jiném místě než u segmentu S1. Konkrétní hodnoty redukovaného napětí a velikosti průhybů konstrukce segmentu S1 v jednotlivých úsecích jsou uvedeny v Příloze B.

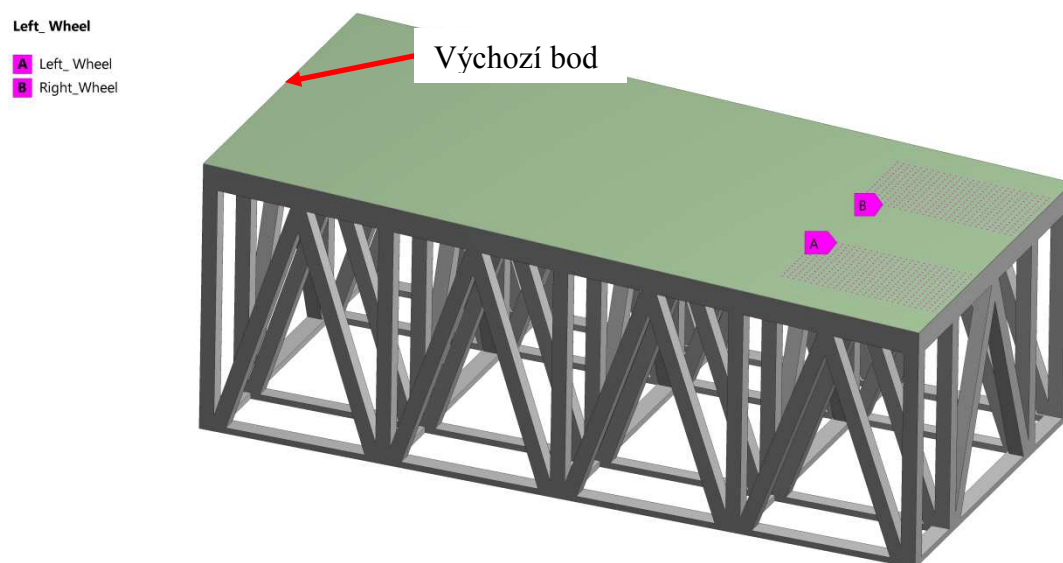


Obrázek č. 39: Průběh maximálního redukovaného napětí v konstrukci segmentu S4



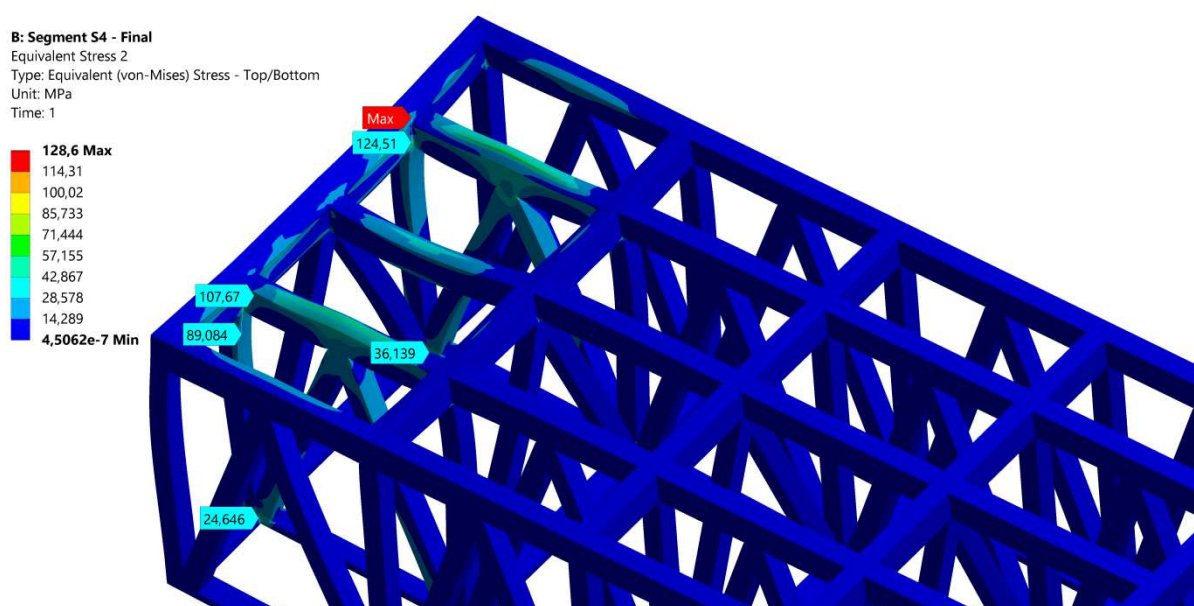
Pro ilustraci je na obrázku č. 40 zobrazena finální konstrukce segmentu S4 s vyznačením polohy kol předového podvozku, kde byla dosažena maximální hodnota redukovaného napětí.

Obrázek č. 40: Zobrazení polohy kol předového podvozku, kde hodnota redukovaného napětí dosahuje maximální hodnoty na segmentu S4



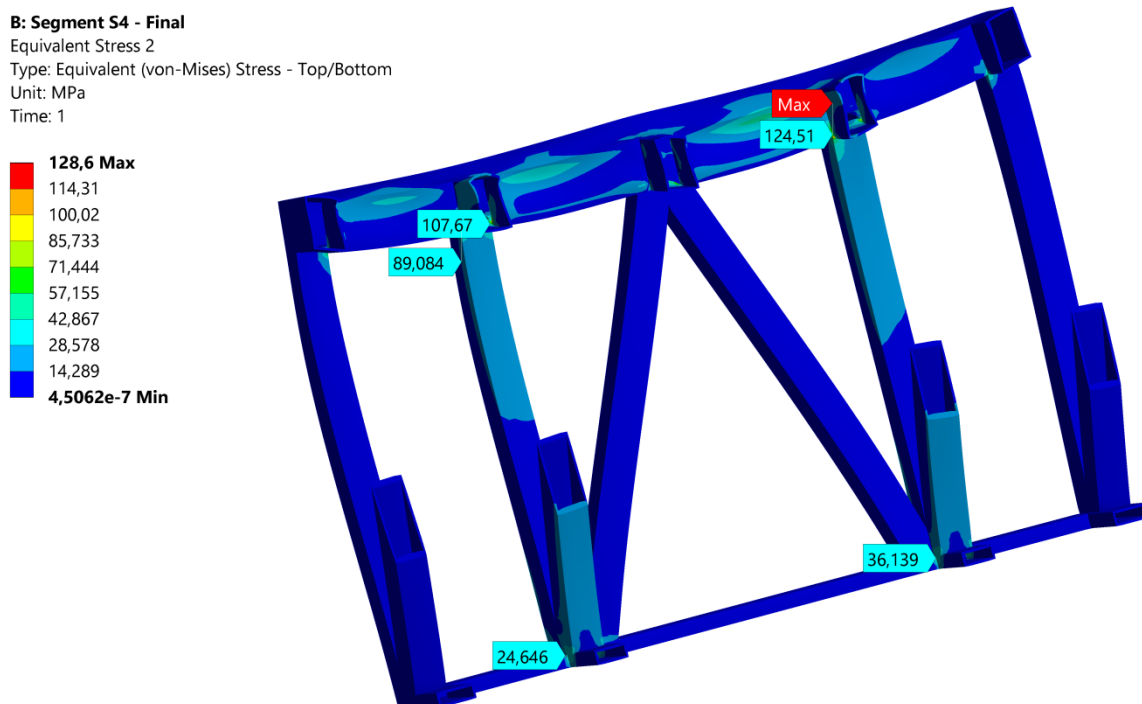
Na následujících obrázcích budou zobrazeny průběhy redukovaného napětí zatíženého segmentu S4. Pro lepší názornost průběhu redukovaného napětí v konstrukci budou nejdříve zobrazeny obrázky konstrukce bez pojezdové desky, stejně jak tomu bylo v případě pevnostní kontroly segmentu S1. Jako první bude uveden obrázek celého segmentu S4 (obrázek č. 41), následně bude proveden jeho příčný řez (obrázek č. 42), na kterém budou vyznačeny hodnoty redukovaných napětí v kritických místech. Na obrázku č. 43 bude zobrazen detail kritického místa. Místo s nejvyšší hodnotou redukovaného napětí je na obrázcích vyznačeno červenou značkou s nápisem „Max“.

*Obrázek č. 41: Celkový pohled na místo, kde je nejvyšší hodnota redukovaného napětí konstrukce segmentu S4*

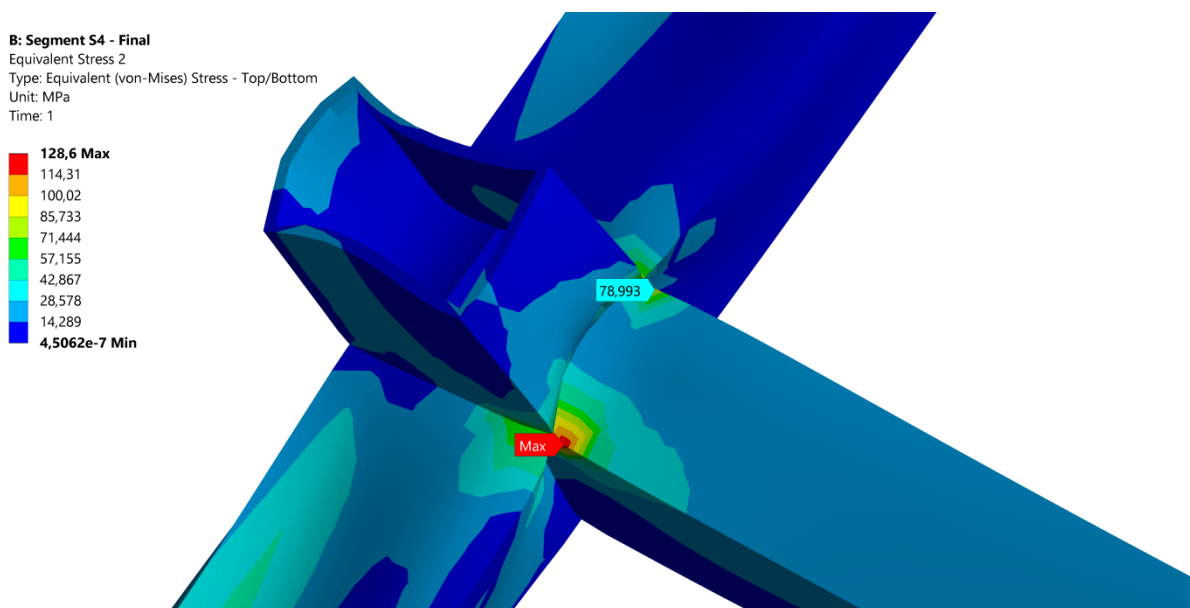




Obrázek č. 42: Příčný řez segmentu S4 s vyznačeným místem s maximální hodnotou redukovaného napětí



Obrázek č. 43: Detailní pohled kritického místa segmentu S4



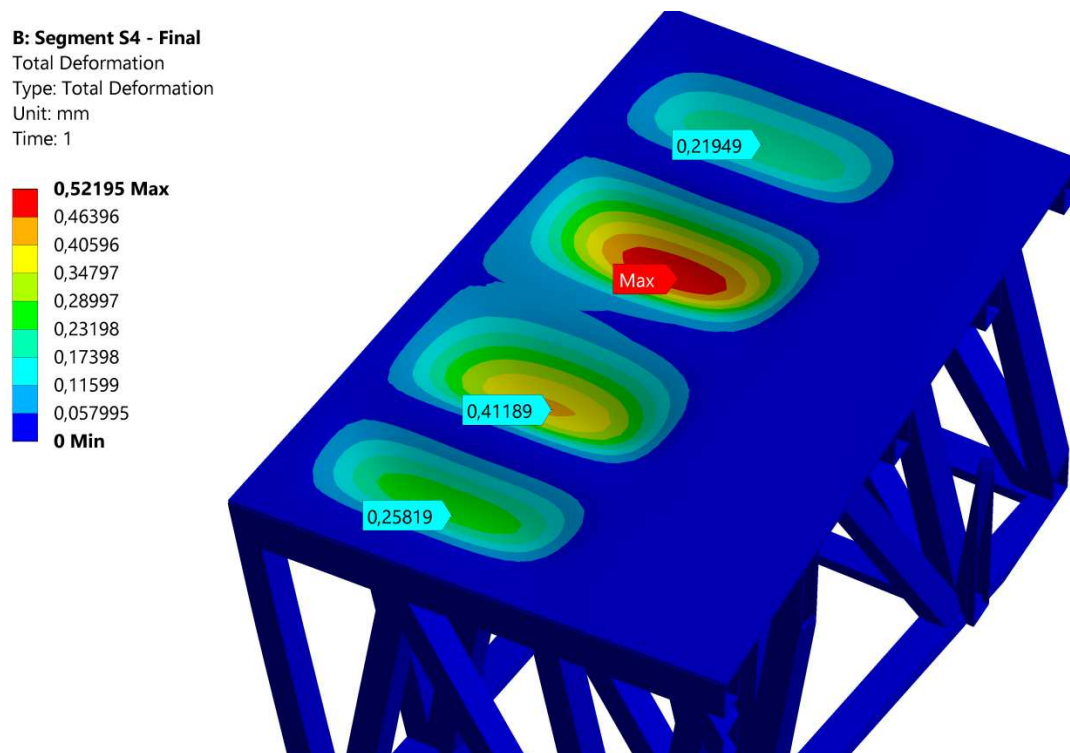
Konstrukce nájezdové rampy bude vyrobena z oceli S355J0. Výsledný bezpečnostní koeficient  $k$  pro redukované napětí  $\sigma_{red} = 128,66 \text{ MPa}$  jsem určil podle vztahu (4.1) a je:

$$k = \frac{R_e}{\sigma_{red}} = \frac{355}{128,66} = 2,75$$

kde  $R_e$  je mez kluzu pro konstrukční ocel S355J0.

Pro doplnění pevnostní kontroly jsou na obrázku č. 44 zobrazeny velikosti průhybů pojezdového plechu po zatížení příďovým podvozkem vrtulníku. Maximální průhyb pojezdového plechu je 0,52 mm.

Obrázek č. 44: Velikosti průhybů pojezdové desky po zatížení



#### 4.6 Vyhodnocení pevnostní kontroly segmentů S1 a S4

Vzhledem k tomu, že postup pevnostní kontroly včetně slovního popisu byl již proveden v předchozí podkapitole, bude vyhodnocení pevnostní kontroly finálních konstrukcí segmentů S1 a S4 bude pro lepší přehlednost uvedeno v tabulce č. 15:

Tabulka č. 15: Výsledky pevnostní analýzy finální konstrukce segmentů S1 a S4

	Segment S1	Segment S4
Maximální hodnota redukovaného napětí	133,25 MPa	128,66 MPa
Dosažený bezpečnostní koeficient	2,66	2,75
Maximální průhyb pojezdového plechu	1,56 mm	0,52 mm
Hmotnost konstrukce	57,039	80,359 kg

Na základě provedené pevnostní analýzy můžu konstatovat, že navržená ocelová konstrukce segmentu S1 vyhovuje jak z hlediska bezpečnostního koeficientu, tak z hlediska hmotnosti. Na druhou stranu, navržená ocelová konstrukce segmentu S4 vyhovuje bezpečnostní podmínce, avšak překračuje o 20 kg požadovanou hmotnost. Pro přehlednost je splnění, či nesplnění vstupních podmínek uvedeno v následující tabulce č. 16.

*Tabulka č. 16: Vyhodnocení splnění stanovených podmínek*

Zadaná podmínka		Segment S1	Segment S4
Bezpečnostní koeficient	$k = 2,5 - 3$	<b>VYHOVUJE</b>	<b>VYHOVUJE</b>
Maximální hmotnost	$m = 60 \text{ kg}$	<b>VYHOVUJE</b>	<b>NEVYHOVUJE</b>

## 5 ZÁVĚR

Bakalářská práce byla zaměřena na návrh a pevnostní kontrolu nájezdové rampy vrtulníku Mi-171Š. Kompletní nájezdový systém je určen, jak pro kola hlavního podvozku, tak i pro příďový podvozek. Cílem bakalářské práce bylo vytvořit návrh a pevnostní kontrolu dvou segmentů nájezdové rampy příďového podvozku, a to segmenty S1 a S4.

V první kapitole bakalářské práce byly stanoveny podmínky, které by měly být splněny. Konstrukčním materiálem byla zvolena konstrukční ocel S355, která je dobře svařitelná a nájezdovou rampu by bylo možné zhotovit silami a prostředky letky oprav letecké techniky. Řešení stanoveného úkolu bylo provedeno metodou konečných prvků, a to v prostředí výpočetního programu ANSYS Workbench 18.2. Rovněž bylo provedeno zjednodušené analytické řešení segmentu S4, které spočívalo ve statickém posouzení příhradové konstrukce v rovině

a kontrole nejvíce namáhaných prutů na vzpěr.

Pevnostní kontrola navržené konstrukce probíhala ve třech krocích. Nejdříve bylo nutné, prostřednictvím nosníkových prvků, najít vhodné rozměry ocelových profilů. Na pojezdovou část nájezdové rampy byl zvolen ocelový plech s prolisy. Aby nedocházelo při pevnostní kontrole ke zkreslení hodnot redukovaných napětí, bylo nutné vytvořit odpovídající model pojezdového plechu. Z vybraných ocelových profilů byly pomocí skořepinových prvků vytvořeny modely segmentů S1 a S4 a na nich byla následně provedena pevnostní kontrola. Jelikož ani jeden z navržených segmentů nesplňoval stanovený bezpečnostní koeficient, bylo nutné provést jejich optimalizaci. Vzhledem k rozsahu práce byla provedena pouze jedna konstrukční úprava konstrukce každého ze segmentů.

Závěrem můžu říct, že oba navržené segmenty vyhověly podmínce bezpečnostního koeficientu. Bohužel ale nebyla splněna podmínka maximální hmotnosti 60 kg u segmentu S4, jehož hmotnost činí 80,359 kg.

Doporučuji provést další optimalizaci konstrukce segmentu S4, tak aby byly splněny obě podmínky současně.

## 6 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek č. 1: Nakládání vrtulníku MI-171Š do transportního letadla An-124 Russlan.....	10
Obrázek č. 2: Vrtulník Mi-171Š v nákladovém prostoru letadla C-17Globemaster III .....	11
Obrázek č. 3: Nájezdový systém vrtulníku Mi-171Š do transportního letadla C-17.....	13
Obrázek č. 4: Dřevěná nájezdová rampa předového podvozku s očíslovanými segmenty .....	14
Obrázek č. 5: Nájezdová rampa předového podvozku s vyznačením 80 mm nerovností .....	15
Obrázek č. 6: Podvozek vrtulníku Mi-171Š .....	17
Obrázek č. 7: Náčrtek nájezdové rampy po odstranění nerovností.....	19
Obrázek č. 8: Geometrický model ocelové konstrukce segmentu S1 .....	22
Obrázek č. 9: Základní rozměry segmentu S1 .....	22
Obrázek č. 10: Okrajové podmínky segmentu S1 .....	23
Obrázek č. 11: Průběh ohybového momentu na modelu z nosníkových prvků segmentu S1 ..	26
Obrázek č. 12: Detailní pohled na průběh ohybového momentu zatíženého segmentu S1 .....	26
Obrázek č. 13: Geometrický model ocelové konstrukce segmentu S4.....	27
Obrázek č. 14: Základní rozměry segmentu S4 .....	27
Obrázek č. 15: Označení styčníků a prutů soustavy .....	28
Obrázek č. 16: Uvolnění prutové soustavy .....	28
Obrázek č. 17: Nahrazení reakce B vnější stykovou výslednicí $X_1$ .....	30
Obrázek č. 18: Rozdělení prutové soustavy na dva zatěžovací stavy .....	31
Obrázek č. 19: Základní rozměry ocelového profilu .....	33
Obrázek č. 20: Závislost kritického napětí na štíhlostním poměru.....	34
Obrázek č. 21: Okrajové podmínky modelu segmentu S4 z nosníkových prvků.....	36
Obrázek č. 22: Průběh ohybového momentu na modelu z nosníkových prvků segmentu S4 ..	38
Obrázek č. 23: Detailní pohled na průběh ohybového momentu zatíženého nosníku.....	39
Obrázek č. 24: Okrajové podmínky pojezdových plechů.....	41
Obrázek č. 25: Zobrazení konečno- prvkové sítě pojezdových plechů .....	42
Obrázek č. 26: Vzájemné porovnání průhybů desek pojezdových plechů .....	43
Obrázek č. 27: Modifikovaná konstrukce segmentu S1 .....	45
Obrázek č. 28: Modifikovaná konstrukce segmentu S4 .....	46
Obrázek č. 29: Půdorys kol předového podvozku .....	48
Obrázek č. 30: Okrajové podmínky finální konstrukce segmentu S1 .....	48
Obrázek č. 31: Okrajové podmínky finální konstrukce segmentu S4 .....	49
Obrázek č. 32: Konečno- prvkový model finální konstrukce segmentu nájezdové rampy S1 ..	50
Obrázek č. 33: Konečno-prvkový model finální konstrukce segmentu S4 .....	51

Obrázek č. 34: Průběh maximálního redukovaného napětí v konstrukci segmentu S1 .....	52
Obrázek č. 35: Zobrazení polohy kol příďového podvozku, kde hodnota redukovaného napětí dosahuje maximální hodnoty na segmentu S1 .....	52
Obrázek č. 36: Celkový pohled na segment S1s vyznačeným místem s maximální hodnotou redukovaného napětí .....	53
Obrázek č. 37: Příčný řez segmentem S1 s vyznačeným místem s maximální hodnotou redukovaného napětí .....	53
Obrázek č. 38: Velikost průhybu pojezdového plechu segmentu S1 .....	54
Obrázek č. 39: Průběh maximálního redukovaného napětí v konstrukci segmentu S4.....	55
Obrázek č. 40: Zobrazení polohy kol příďového podvozku, kde hodnota redukovaného napětí dosahuje maximální hodnoty na segmentu S4.....	55
Obrázek č. 41: Celkový pohled na místo, kde je nejvyšší hodnota redukovaného napětí konstrukce segmentu S4 .....	56
Obrázek č. 42: Příčný řez segmentu S4 s vyznačeným místem s maximální hodnotou redukovaného napětí .....	57
Obrázek č. 43: Detailní pohled kritického místa segmentu S4.....	57
Obrázek č. 44: Velikosti průhybů pojezdové desky po zatížení.....	58

## 7 SEZNAM TABULEK

Tabulka č. 1: Rozložení celkové váhy vrtulníku mezi jednotlivá kola podvozku .....	16
Tabulka č. 2: Rozměry ocelových profilů pro návrh konstrukce segmentu S1 .....	20
Tabulka č. 3: Rozměry ocelových profilů pro návrh konstrukce segmentu S4 .....	21
Tabulka č. 4: Parametry konečno-prvkového modelu z nosníkových prvků segmentu S1 .....	24
Tabulka č. 5: Výsledky z programu ANSYS Workbench 18.2 pro zvolené ocelové profily ...	25
Tabulka č. 6: Rozměry ocelových profilů zvolené varianty pro konstrukci segmentu S1 .....	25
Tabulka č. 7: Výpočet osových sil v prutech .....	32
Tabulka č. 8: Vstupní údaje pro výpočet vzpěru prutu č. 13 .....	33
Tabulka č. 9: Parametry konečno-prvkového modelu z nosníkových prvků segmentu S4 .....	37
Tabulka č. 10: Výsledky z programu ANSYS Workbench 18.2 pro zvolené ocelové profily ..	37
Tabulka č. 11: Rozměry ocelových profilů zvolené varianty pro konstrukci segmentu S4 .....	38
Tabulka č. 12: Parametry konečno-prvkového modelu pojezdového plechu .....	41
Tabulka č. 13: Fyzikální parametry pojezdových plechů .....	43
Tabulka č. 14: Parametry konečno-prvkových modelů segmentů S1 a S4 .....	50
Tabulka č. 15: Výsledky pevnostní analýzy finální konstrukce segmentů S1 a S4 .....	58
Tabulka č. 16: Vyhodnocení splnění stanovených podmínek .....	59

## 8 LITERATURA

- [1] LENERT, Jiří. *Pružnost a pevnost I*. 3. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2009. 140 s. ISBN 978-80-248-2111-5.
- [2] LENERT, Jiří. *Pružnost a pevnost II*. 2. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2009. 173 s. ISBN 978-80-248-1959-4.
- [3] FUSEK, Martin, ROJÍČEK, Jaroslav, *Metoda konečných prvků I* [online], Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2013, [ISBN 978-80-248-3023-0](https://www.vsb.cz/ISBN/978-80-248-3023-0), Dostupné z: [http://projekty.fs.vsb.cz/463/edubase/VY\\_01\\_010/](http://projekty.fs.vsb.cz/463/edubase/VY_01_010/)
- [4] JULIŠ, Karel, SLAVÍK, Adolf a TEPŘÍK, Otakar. *Statika*. Vydání první. Praha: SNTL, 1987. 212s.
- [5] KADLČÁK, Jaroslav a KYTÝR, Jiří. *Statika stavebních konstrukcí. II., Staticky neurčité prutové konstrukce*. V Brně: VUTIUM, 2004 [i.e. 2007]. 431 s. Učebnice; sv. 7. ISBN 978-80-214-3428-8.
- [6] SEDLÁČEK, Radek. *Staticky neurčité prutové soustavy*. Brno, 2012. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky.
- [7] ČSN EN 1915-2 +A1 (319322). *Pozemní zařízení pro letadla - Všeobecné požadavky - Část 2: Požadavky na stabilitu a pevnost, výpočty a zkušební metody*. Praha: Úřadu pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015.
- [8] PAVLÍČEK, Luboš. V Náměšti je obří C-17 Globemaster kvůli nakládce vrtulníku. *Ceskenoviny* [online]. 2018 [cit. 2019-05-03]. Dostupné z: <https://www.ceskenoviny.cz/zpravy/v-namesti-je-obri-c-17-globemaster-kvuli-nakladce-vrtulniku/1633305>



## 9 SEZNAM PŘÍLOH

**Příloha A:** Hodnoty maximálních napětí a deformací v závislosti na vzdálenosti od okraje segmentu S1 nájezdové rampy

**Příloha B:** Hodnoty maximálních napětí a deformací v závislosti na vzdálenosti od okraje segmentu S4

**Příloha C:** Elektronický nosič CD - Text bakalářské práce

**Příloha A:** Hodnoty maximálních napětí a deformací v závislosti na vzdálenosti od okraje segmentu S1 nájezdové rampy

Vzdálenost	Maximální hodnoty redukovaného napětí [MPa]	Maximální hodnoty průhybu [mm]
0 - 270	108,82	0,066
50 - 320	92,19	0,065
100 - 370	88,63	0,062
150 - 420	112,04	0,071
200 - 470	108,6	0,07
250 - 520	105,69	0,067
300 - 570	85,54	0,063
350 - 620	101,04	0,062
400 - 670	95,72	0,058
450 - 620	93,21	0,05
500 - 770	98,84	0,058
550 - 820	117,43	0,074
600 - 870	117,58	0,073
650 - 920	117,16	0,071
700 - 970	109,01	0,068
<b>750 - 1020</b>	<b>133,25</b>	<b>0,063</b>
800 - 1070	124,02	0,057
850 - 1120	106,14	0,049
900 - 1170	107,54	0,045
950 - 1220	105,58	0,047

**Příloha B:** Hodnoty maximálních napětí a deformací v závislosti na vzdálenosti od okraje segmentu S4

Vzdálenost	Maximální hodnoty redukovaného napětí [MPa]	Maximální hodnoty průhybu [mm]
0 - 270	96,53	0,057
50 - 320	78,08	0,057
100 - 370	79,61	0,054
150 - 420	75,52	0,054
200 - 470	83,04	0,05
250 - 520	89,61	0,052
300 - 570	92,83	0,054
350 - 620	95,88	0,054
400 - 670	96,11	0,052
450 - 620	92,3	0,051
500 - 770	88,24	0,05
550 - 820	92,15	0,052
600 - 870	93,01	0,053
650 - 920	101,32	0,053
700 - 970	102,66	0,052
750 - 1020	101,92	0,052
800 - 1070	91,21	0,05
850 - 1120	90,78	0,053
900 - 1170	87,24	0,067
<b>950 - 1220</b>	<b>128,66</b>	<b>0,075</b>